

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## MODEL LABORATORNÍHO POHONU PRO VÝUKOVÉ ÚČELY

MODEL OF LABORATORY TESTBENCH FOR EDUCATIONAL PURPOSES

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Januška

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ivo Pazdera, Ph.D.

BRNO 2020

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Adam Januška

**ID:** 186102

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Model laboratorního pohonu pro výukové účely

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište princip a jednotlivé komponenty laboratorního pracoviště pro výuku elektrických pohonů.
2. V programu MATLAB/Simulink vytvořte model tohoto pracoviště a dle pokynů vedoucího, realizujte počítačové simulace vybraných aplikací z elektrických pohonů.
3. Přehledně popište vytvořené modely a jejich výsledky.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Klíma B., Střídavé pohony, 2014
- [2] PATOČKA, M. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. odborné knihy. odborné knihy. Brno: VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN: 978-80-214-4003- 6.
- [3] Veltman A., Pulle D., Doncker R.W, Fundamentals of Electrical Drives, 2007
- [4] Pyrhonen J., Hrabovcova V., Semeken R., Electrical Machine Drives Control, Wiley, 2016
- [5] Bacha S., Munteanu I., Bratcu A., Power Electronic Modeling and Control, Springer, 2014

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 1.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Ivo Pazdera, Ph.D.

**doc. Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.**  
předseda oborové rady

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Diplomová práce je zaměřena na simulaci laboratorního standu nacházejícího se na ústavu UVEE Vysokého učení technického v Brně, který obsahuje stejnosměrný a asynchronní motor připojených na stejné hřídeli. Součástí práce je sestavení modelu stejnosměrného motoru, návrh a připojení regulátoru proudu a otáček pro tento motor a sestavení měniče. Dále je sestaven model asynchronního motoru s kotvou nakrátko a jsou vytvořeny regulační obvody pro skalární a vektorové řízení. Simulace tohoto standu pak probíhají v programu Simulink, který je součástí programu Matlab.

## **Klíčová slova**

Stejnosměrný motor, Asynchronní motor, regulátor otáček, regulátor proudu, Simulink, měnič, skalární řízení, vektorové řízení

## **Abstract**

This thesis is focused on simulation of laboratory stand located on University of technology in Brno which is containing DC and asynchronous motor. This thesis includes mathematical model of DC motor, regulator of current, regulator of speed and DC convertor. It also contains model of asynchronous squirrel cage motor and models for scalar and vector control. Whole simulation is calculated in Simulink which is part of program Matlab.

## **Keywords**

DC motor, Asynchronous motor, regulator of current, regulator of speed, Simulink, convertor, skalar control, vector control

## **Bibliografická citace:**

JANUŠKA, Adam. *Model laboratorního pohonu pro výukové účely* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127374>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Ivo Pazdera.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Model laboratorního pohonu pro výukové účely“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Ivu Pazderovi, Ph.D. za odborné vedení, odbornou pomoc, cenné rady, konzultace a trpělivost.

# Obsah

Úvod .....	1
1 MATLAB Simulink .....	2
2 Laboratorní stand.....	3
3 Stejnosměrný motor s permanentními magnety .....	5
3.1 Regulátor proudu stejnosměrného motoru .....	8
3.2 Regulátor otáček stejnosměrného motoru .....	9
4 Asynchronní Stroj.....	11
4.1 Model asynchronního stroje.....	13
4.1.1 Prostorový vektor v komplexní rovině.....	13
4.1.2 Model asynchronního stroje ve formě $\Gamma$ -článku .....	15
4.1.3 Model asynchronního stroje ve formě inverzního $\Gamma$ -článku .....	16
4.1.4 Model asynchronního motoru v dq souřadnicích .....	18
4.2 Řízení asynchronního stroje.....	21
4.2.1 Skalární řízení .....	21
4.2.2 Vektorové řízení .....	23
4.3 Regulátory asynchronního stroje .....	25
4.4 Výpočty parametrů asynchronního stroje .....	27
5 Pulzní měniče .....	29
5.1 Pulzní šířková modulace pro pulzní měnič.....	30
6 Ovládání simulace .....	32
7 Výsledky simulace .....	33
7.1 Rozběh SM a zatěžování od 0 - $M_n$ .....	33
7.2 Rozběh SM s konstantním momentem.....	35
7.3 Rozběh ASM se skalárním řízením v otevřené smyčce a zatěžování.....	37
7.4 Rozběh ASM se skalárním řízením se zpětnou vazbou a zatěžování.....	39
7.5 Rozběh ASM s vektorovým rotorovým řízením a zatěžování .....	40
7.6 Rozběh ASM s konstantním momentem.....	42
8 Závěr.....	45
Literatura .....	47

## Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Simulovaný laboratorní stand .....	3
Obrázek 3.1: Řez stejnosměrným čtyřpólovým strojem s permanentními magnety .....	6
Obrázek 3.2: Model stejnosměrného stroje v programu simulink .....	7
Obrázek 3.3: Regulovaná soustava regulátorem proudu .....	8
Obrázek 3.4: Smyčka regulátoru otáček .....	9
Obrázek 3.5: Model regulátorů v programu simulink .....	10
Obrázek 4.1: Řez asynchronním strojem .....	12
Obrázek 4.2: Vektory statorových proudů převedené do systému $\alpha\beta$ .....	14
Obrázek 4.3: Model asynchronního stroje ve formě $\Gamma$ -článku .....	15
Obrázek 4.4: Model $\Gamma$ -článku v programu simulink .....	16
Obrázek 4.5: Model asynchronního stroje ve formě inverzního $\Gamma$ -článku .....	17
Obrázek 4.6: Model $\Gamma$ -článku v programu simulink .....	17
Obrázek 4.7: Náhradní schéma $\Gamma$ -článku asynchronního stroje v ose $d$ .....	19
Obrázek 4.8: Náhradní schéma $\Gamma$ -článku asynchronního motoru v ose $q$ .....	19
Obrázek 4.9: Náhradní schéma inverzního $\Gamma$ -článku asynchronního motoru v ose $d$ .....	20
Obrázek 0.10: Náhradní schéma inverzního $\Gamma$ -článku asynchronního motoru v ose $q$ .....	
Obrázek 4.11: Regulační model skalárního řízení otáček v otevřené smyčce .....	22
Obrázek 4.12: Regulační model skalárního řízení otáček se zpětnou vazbou .....	22
Obrázek 4.13: Regulační model skalárního řízení momentu .....	23
Obrázek 4.14: Regulační model vektorového řízení statorového toku .....	24
Obrázek 4.15: Regulační model vektorového řízení rotorového toku .....	24
Obrázek 5.1: Pulzní měniče v programu simulink .....	29
Obrázek 5.2: Modulátor čtyřkvadrantového pulzního měniče .....	31
Obrázek 5.3: Blok komparátoru čtyřkvadrantového pulzního měniče .....	31
Obrázek 5.4: Usměrňovač s brzdým odporem .....	32
Obrázek 6.1: Tabulky pro nastavení simulace .....	33
Obrázek 7.1: Průběh momentů motorů v simulaci 1 .....	34
Obrázek 7.2: Průběh otáček v simulaci 1 .....	34
Obrázek 0.3: Průběh momentů strojů v simulaci 2 .....	34
Obrázek 0.4: Průběh otáček v simulaci 2 .....	35
Obrázek 0.5: Průběh proudů $i_{sd}$ a $i_{sq}$ v simulaci 2 .....	36
Obrázek 0.6: Průběh jmenovitého a skutečného spřaženého toku v simulaci 2 .....	36
Obrázek 0.7: Průběh momentů strojů v simulaci 3 .....	37
Obrázek 0.8: Průběh otáček strojů v simulaci 3 .....	38
Obrázek 0.9: Detail průběhu otáček strojů v simulaci 3 .....	38
Obrázek 0.10: Průběh spřaženého magnetického toku v simulaci 3 .....	38
Obrázek 0.11: Průběh momentů strojů v simulaci 4 .....	39
Obrázek 0.12: Průběh otáček v simulaci 4 .....	39



<i>Obrázek 0.13: Průběh spřaženého magnetického toku v simulaci 4.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 7.14: Průběh momentu strojů v simulaci 5 .....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 0.15: Detail průběhu momentů strojů v simulaci 5.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 0.16: Průběh otáček v simulaci 5.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 0.17: Průběh rotorového spřaženého toku v simulaci 5.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 0.18: Průběh momentů strojů v simulaci 6.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 0.19: Průběh otáček v simulaci 6.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 0.20: Průběh napětí meziobvodu v simulaci 6.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 0.21: Průběh statorového spřaženého magnetického toku v simulaci 6...-...44</i>	

## Seznam veličin a zkratk

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
C	Transformační konstanta [-]
a	Komplexní jednotkový vektor [-]
k	Činitel vazby cívek [-]
PI	Proporcionálně integrační
pp	Počet pólpárů stroje
ASM	Asynchronní motor
SM	Stejnoseměrný motor
$U_n$	Jmenovité napětí [V]
$U_a$	Napětí na svorkách kotvy stroje [V]
$U_i$	Indukované napětí [V]
$U_d$	Napětí meziobvodu [V]
$u_{sd}$	Okamžité napětí statoru v ose d [V]
$u_{sq}$	Okamžité napětí statoru v ose q [V]
$u_{s\alpha\beta}$	Okamžité napětí statoru v souřadnicích $\alpha\beta$ [V]
$u_{sdq}$	Okamžité napětí statoru v souřadnicích dq [V]
$u_{sR_s, \alpha\beta}$	Okamžité napětí statorové indukčnosti v souřadnicích $\alpha\beta$ [V]
$u_{rR_r, kl}$	Okamžité napětí rotorové indukčnosti v souřadnicích kl [V]
$u_{rkl}$	Okamžité napětí rotoru v souřadnicích kl [V]
$P_n$	Jmenovitý výkon [W]
$M_n$	Jmenovitý moment [Nm]
$M_z$	Záběrný moment [Nm]
$M_{max}$	Maximální moment [Nm]
$I_n$	Jmenovitý proud [A]
$I_K$	Záběrný proud [A]
$I_a$	Proud kotvou stroje [A]
$i_a$	Proud statorové cívky a [A]
$i_b$	Proud statorové cívky b [A]
$i_c$	Proud statorové cívky c [A]
$i_{sd}$	Okamžitý proud statoru v ose d [A]

$i_{sq}$	Okamžitý proud statoru v ose q [A]
$i_{rd}$	Okamžitý proud rotoru v ose d [A]
$i_{rq}$	Okamžitý proud rotoru v ose q [A]
$i_{s\alpha\beta}$	Okamžitý proud statoru v souřadnicích $\alpha\beta$ [A]
$i_{sdq}$	Okamžitý proud statoru v souřadnicích dq [A]
$i_{r\alpha\beta}$	Okamžitý proud rotoru v souřadnicích $\alpha\beta$ [A]
$i_{r'dq}$	Okamžitý přepočítaný proud rotoru v souřadnicích dq [A]
$i_{r'\alpha\beta}$	Okamžitý přepočítaný proud rotoru v souřadnicích $\alpha\beta$ [A]
$i_{skl}$	Okamžitý proud statoru v souřadnicích kl [A]
$i_{rkl}$	Okamžitý proud rotoru v souřadnicích kl [A]
$i_{r'kl}$	Okamžitý přepočítaný proud rotoru v souřadnicích kl [A]
$n_n$	Jmenovité otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]
$\omega$	Úhlová rychlost [rad/s]
$\omega_s$	Synchronní úhlová rychlost [rad/s]
$f$	frekvence [ $\text{s}^{-1}$ ]
$J$	Setrvačnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ]
$J_c$	Celková setrvačnost soustrojí [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ]
$\cos\varphi$	Účinník [-]
$\eta$	Účinnost [-]
$R_a$	Odpor kotvy motoru [ $\Omega$ ]
$R_s$	Odpor statoru motoru [ $\Omega$ ]
$R_r$	Odpor rotoru motoru [ $\Omega$ ]
$R_r'$	Přepočítaný odpor rotoru motoru [ $\Omega$ ]
$R_{rig}'$	Odpor rotoru motoru ve tvaru inverzního $\Gamma$ -článku [ $\Omega$ ]
$L_a$	Indukčnost vinutí kotvy [H]
$L_s$	Vlastní indukčnost vinutí statoru [H]
$L_r$	Vlastní indukčnost vinutí rotoru [H]
$L_{\sigma r}'$	Přepočítaná rozptylová indukčnost rotorového vinutí [H]
$L_{\sigma s}$	Rozptylová indukčnost statorového vinutí [H]
$c_\phi$	Konstanta stroje [-]
$B$	Viskozita [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]
$F_1(p)$	Přenosová funkce stejnosměrného proudu
$F_{OM}(p)$	Přenosová funkce optimálního modulu

$F_{ri}(p)$	Přenosová funkce regulátoru proudu
$F_{ro}(p)$	Přenosová funkce regulátoru otáček
$F_{so}(p)$	Přenosová funkce symetrického optima
$\tau_{\sigma}$	Obecná časová konstanta [s]
$\tau_m$	Časová konstanta měniče [s]
$\tau_{cw}$	Časová konstanta čidla otáček [s]
$K_{cp}$	Zesílení čidla proudu [-]
$K_{cw}$	Zesílení čidla otáček [-]
$K_m$	Zesílení měniče [-]
$K_s$	Celkové zesílení [-]
$x_{\alpha}$	Obecná veličina v ose $\alpha$
$x_{\beta}$	Obecná veličina v ose $\beta$
$x_u$	Obecná veličina v cívce u
$x_v$	Obecná veličina v cívce v
$x_w$	Obecná veličina v cívce w
$x_k$	Obecná veličina v ose k
$x_l$	Obecná veličiny v ose l
$\theta_r$	Úhel natočení rotoru [°]
$M$	Vzájemná indukčnost [H]
$\Psi$	Spřažený magnetický tok [Wb]
$\Psi_s$	Spřažený magnetický tok statoru [Wb]
$\Psi_{r'}$	Přepočítaný spřažený magnetický tok rotoru [Wb]
$\Psi_{s\alpha\beta}$	Spřažený magnetický tok statoru v souřadnicích $\alpha\beta$ [Wb]
$\Psi_{skl}$	Spřažený magnetický tok statoru v souřadnicích kl [Wb]
$\Psi_{rkl}$	Spřažený magnetický tok rotoru v souřadnicích kl [Wb]
$\Psi_{sdq}$	Spřažený magnetický tok statoru v souřadnicích dq [Wb]
$\Psi_{sd}$	Spřažený magnetický tok statoru v ose d [Wb]
$\Psi_{sq}$	Spřažený magnetický tok statoru v ose q [Wb]

# ÚVOD

Pro názornou výuku studentů na fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií na Vysokém učení technickém v Brně byl vytvořen laboratorní stand, který se skládá ze dvou elektrických strojů, a to stejnosměrného motoru s permanentními magnety a asynchronního motoru s klecí nakrátko.

Cílem této semestrální práce je názorně předvést studentům chování tohoto standu jeho simulací, která probíhá v rozšíření Simulink, který je součástí programu Matlab. Hodnoty vstupních veličin celého systému lze libovolně měnit, aby studenti viděli změny v chování systému. Zároveň je model, co nejvíce zjednodušen pro snadné pochopení závislostí veličin na sobě, vztahů mezi nimi, a aby si studenti ukotvili znalosti získané v teoretické výuce. Model je zároveň sestaven tak, aby se co nejvíce blížil reálnému standu v laboratoři. To umožňuje porovnání teoretických výsledků v programu s reálně naměřenými hodnotami.

Součástí této práce je simulace tohoto standu a popsání jednotlivých součástí. Pro simulaci byl vytvořeno náhradní schéma stejnosměrného a asynchronního motoru, měniče, ze kterého jsou stroje napájeny, jejich řídicí obvody a napěťový neřízený usměrňovač. Byl vytvořen řídicí obvod obsahující regulátor proudu a otáček, který ovládá pulzní měnič napájející stejnosměrný motor. Zároveň byly vytvořeny řídicí algoritmy pro skalární a vektorovou regulaci asynchronního motoru. Napětí na tomto asynchronním motoru je řízeno přes trojfázový střídač, který je společně s pulzním měničem napájen ze šestipulzního neřízeného usměrňovače.

Pro ověření funkčnosti celého modelu bylo změřeno 6 simulací s rozdílnými nastaveními a režimy práce strojů.

# 1 MATLAB SIMULINK

Celá simulace probíhá v programu Matlab Simulink. Program slouží k vytváření modelů dynamických soustav, jejich simulaci a vizualizaci výsledků. Model soustavy může být vytvořen použitím matematických rovnic nebo za použití bloků, které reprezentují určité prvky systému. Je to především grafický editor, který ovšem svojí provázaností s programem Matlab dokáže pracovat i se složitými algoritmy ve spojitých i diskrétních systémech. Dále Simulink dokáže i propojení s externím hardwarem pro návrh, implementaci a testování algoritmů [1].

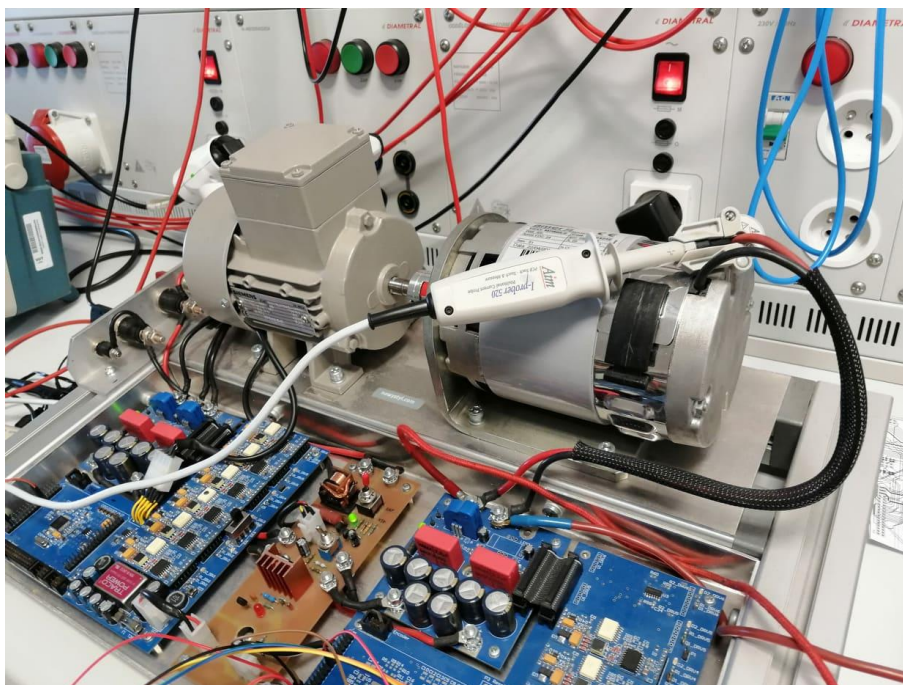
Program disponuje knihovnou obsahující mnoho bloků, ať už základních nebo složitých systémů z různých odvětví matematiky, mechaniky, elektrotechniky, logické a číslicové techniky. Jednou z důležitých součástí knihovny Simulinku je i specializovaný toolbox Simscape. Tento toolbox obsahuje mnoho bloků, které popisují chování různých fyzikálních systémů. Součástí toolboxu Simscape je i knihovna bloků Power Systems, která se specifikuje na bloky popisující chování elektrotechnických systémů. Tato knihovna obsahuje většinu elektrotechnických součástek použitých pro simulaci v této práci jako jsou pasivní a polovodičové součástky, elektrické zdroje a měření [1].

Pro ovládání simulace standu jsou použity interaktivní prvky z knihovny dashboard, které svou přehledností a jednoduchostí představují ideální způsob pro zadávání parametrů simulace.

## 2 LABORATORNÍ STAND

Na rámu z hliníkových profilů je uloženo soustrojí skládající se ze stejnosměrného motoru s permanentními magnety na napájecí napětí 24 V a k němu je pomocí hřídelové spojky připojen třífázový asynchronní motor převinutý na napájecí napětí 3x24V. Každý z motorů je napájený z jednoho z třífázových měničů obsahující každý 6 MOSFET tranzistorů a LEM čidla sloužící pro měření proudu motory pro využití ve zpětné vazbě regulace. Měnič dále obsahuje brzdný odpor, který slouží pro ochranu před přepětím ve stejnosměrném obvodu.

V poslední řadě stand obsahuje i desky budičů a řídicí elektroniky ovládající měniče a motory [2].



*Obrázek 2.1: Simulovaný laboratorní stand*

Pro bezpečnost práce na tomto standu je použito napájecí napětí asynchronního i stejnosměrného motoru 24 V. Z hlediska bezpečnosti byl vybrán asynchronní motor s relativně bezpečnými jmenovitými otáčkami 1350 min<sup>-1</sup>. Z toho důvodu byl vybrán čtyřpólový asynchronní motor 1LA7063-4AA10 od společnosti Siemens Mohelnice [2].

Kvůli použití bezpečného napětí 3x24V a zachování stejného výkonu a momentu musel být motor převinut. Byl proto použit vodič, který má 16,67 -krát větší průřez, než mělo původní vinutí.

*Tabulka 1: Technické parametry asynchronního motoru po převinutí [2]*

Jmenovité napětí $U_n$	3x24	[V]
Jmenovitý výkon $P_n$	180	[W]
Jmenovitý proud $I_n$	9,37	[A]
Jmenovitý moment $M_n$	1,3	[Nm]
Jmenovité otáčky $n_n$	1350	[min <sup>-1</sup> ]
Moment setrvačnosti motoru $J$	0,0004	[kg*m <sup>2</sup> ]
Účinnost $\eta$	60	[%]
Účinník $\cos\varphi$	0,77	[-]
Poměrný záběrný moment $M_z/M_n$	1,9	[-]
Poměrný záběrný proud $I_k/I_n$	3	[-]
Poměrný moment zvratu $M_{\max}/M_n$	2	[-]

Aby asynchronní motor mohl pracovat i v generátorickém režimu, tedy po překročení jmenovitých otáček 1350 m<sup>-1</sup>, byl zvolen stejnosměrný motor s permanentními magnety MP80/S2 od firmy Amer o jmenovitých otáčkách 2966 m<sup>-1</sup> [2].

*Tabulka 2: Technické parametry stejnosměrného motoru [2]*

Jmenovité napětí $U_n$	24	[V]
Jmenovitý výkon $P_n$	413,98	[W]
Jmenovitý proud $I_n$	23,04	[A]
Jmenovitý moment $M_n$	1,33	[Nm]
Jmenovité otáčky $n_n$	2966	[min <sup>-1</sup> ]
Odpor kotvy $R_a$	0,11	[Ω]
Indukčnost kotvy $L_a$	250	[μH]
Konstanta motoru $c_\phi$	0,06	-
Moment setrvačnosti motoru $J$	0,019	[kg*m <sup>2</sup> ]



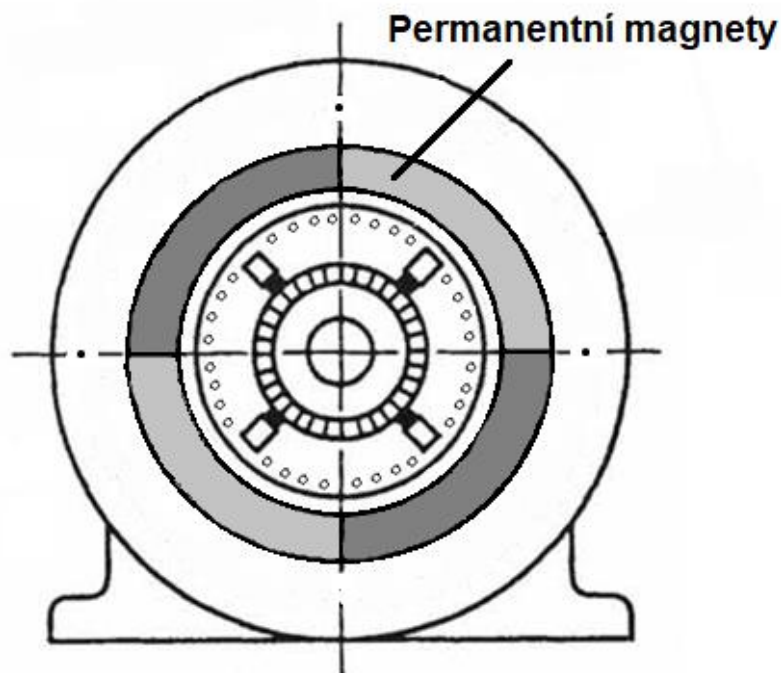
# 3 STEJNOSMĚRNÝ MOTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY

Stejnoseměrné motory patří mezi první vyrobené elektrické motory. Oproti strojům střídavým o stejném výkonu vynikají především menšími rozměry. Stejnoseměrný motor je ideálním regulačním motorem, protože jeho otáčky lze plynule měnit změnou přiváděného napětí [3].

Každý stejnoseměrný motor se skládá ze statoru a rotoru. Stator obsahuje buď budící vinutí uložené v drážkách na pólech statoru, které je napájené stejnoseměrným proudem, nebo permanentní magnety vyvolávající konstantní magnetické pole.

Kotvou motoru je v případě stejnoseměrného motoru rotor, který má po svém obvodu uložené rotorové vinutí napájené stejnoseměrným proudem. Napájení těchto vinutí je přivedeno přes komutátor. Ten zajišťuje přivádění správně orientovaného proudu tak, aby výsledný točivý moment byl souhlasného smyslu, a díky tomu se rotor otáčí stejným směrem. Komutátor složený z uhlíkových kartáčů a lamel musí měnit polaritu tohoto proudu, jelikož rotor se vůči magnetickému poli statoru neustále pohybuje. Nevýhodou komutátoru je třetí uhlíkových kartáčů o lamely. Tím dochází k opotřebení kartáčů a vzniká jiskření, které se dá částečně snížit použitím již zmíněného komutačního vinutí. Výsledný moment působící na rotor vzniká interakcí budícího magnetického pole statoru a magnetického pole rotoru [3].

Pro magnety se používá magneticky tvrdých materiálů, zejména feritů a spékanych materiálů ze vzácných zemin, např. samarium-kobaltu nebo sloučeniny neodymu, železa a bóru [5].



*Obrázek 3.1: Řez stejnosměrným čtyřpólovým strojem s permanentními magnety [4]*

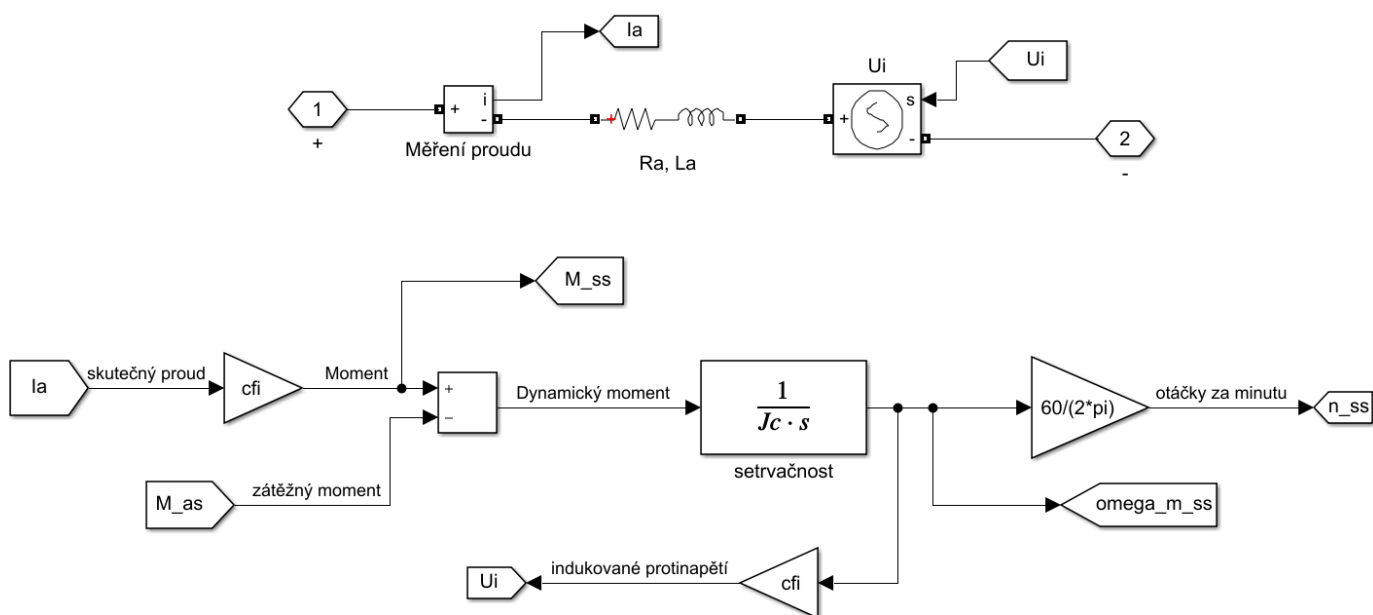
Z hlediska dynamiky lze stejnosměrný stroj vyjádřit pomocí soustavy dvou diferenciálních rovnic. První z nich je rovnice elektrická:

$$U_a = U_i + R_a \cdot I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} \quad (3.1)$$

Druhá diferenciální rovnice, která popisuje stejnosměrný elektrický stroj je rovnice mechanická ve tvaru:

$$M = c_\phi \cdot I_a = J \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega + M_z \quad (3.2)$$

Z těchto dvou rovnic můžeme odvodit schéma popisující chování stejnosměrného stroje, které je v programu Simulink vytvořeno na obrázku 3.2 [6].



Obrázek 3.2: Model stejnosměrného stroje v programu simulink

Pro simulaci stroje potřebujeme znát přenosovou funkci tohoto motoru, kterou zjistíme použitím Laplaceovi transformace na rovnice (3.1):

$$U_a = U_i + R_a \cdot I_a + pL_a \cdot I_a \quad (3.3)$$

Jelikož přenos stroje je poměr výstupu ku vstupu bude přenosová funkce  $F_1(p)$ :

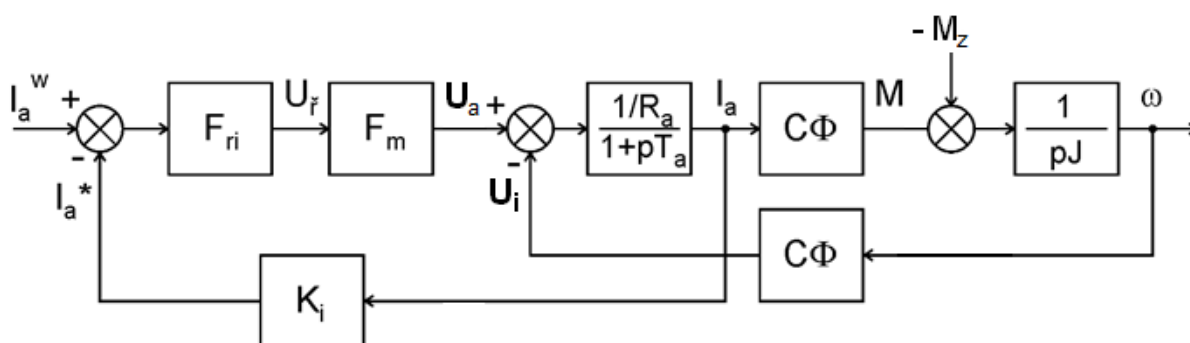
$$F_1(p) = \frac{I_a}{U_a - U_i} = \frac{1}{R_a + pL_a} \quad (3.4)$$

Po zavedení elektrické časové konstanty  $\tau_a = \frac{L_a}{R_a}$  vznikne:

$$F_1(p) = \frac{1/R_a}{1 + p\tau_a} \quad (3.5)$$

### 3.1 Regulátor proudu stejnosměrného motoru

Pro umožnění nastavení regulačních veličin na libovolnou úroveň a jejich udržování slouží regulační zpětnovazební obvod obsahující regulátor, regulovanou soustavu a čidla veličin. V našem případě se jedná o regulaci otáček motoru a jí podřízenou regulaci proudu  $I_a$  procházejícím vinutím motoru. Jedná se tedy o kaskádní regulaci složenou ze dvou regulátorů. Zpětná vazba v regulované soustavě slouží k neustálé kontrole výstupní veličiny. K tomu slouží vhodné čidlo, například čidlo otáček ve formě resolveru nebo proudu ve formě LEM čidla. Každé z těchto čidel má určité zesílení výstupní veličiny, které se projeví v přenosové funkci čidla. Při správné funkci se snaží regulátor, aby velikost výstupní veličiny byla rovna žádané hodnotě. Při optimálně navrženém regulátoru bývá dosaženo minimální ustálené odchylky a rychlé odezvy na skok řízení nebo například na vliv poruchy. [6]



Obrázek 3.3: Regulovaná soustava regulátorem proudu [6]

Na znalostech přenosů otevřené regulační smyčky byly založeny metody optimálního modulu (OM) a symetrického optima (SO), které mají takový přenos, aby odezva regulační smyčky byla optimální. Pro zjištění přenosu navrhovaného regulátoru proudu je použita metoda optimálního modulu ve tvaru [6]:

$$F_{OM}(p) = \frac{1}{2\tau_\sigma p(1+p\tau_\sigma)} \quad (3.6)$$

Metoda optimálního modulu je vhodná pro statické soustavy a pomocí ní vzniklý regulátor PI, popřípadě PID, má překmit přibližně 4 %. Přenos regulátoru proudu  $F_{ri}(p)$  lze vyjádřit:

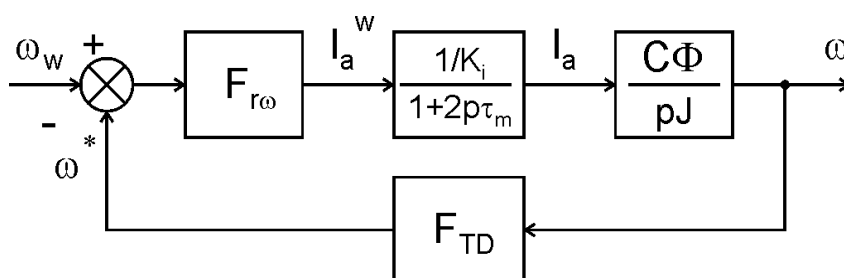
$$F_{ri}(p) = \frac{1}{F_S} \cdot F_{OM} = \frac{1}{2\tau_\sigma p(1+p\tau_\sigma)} \cdot \frac{(1+p\tau_a)(1+p\tau_m)}{\frac{1}{R_a} \cdot K_{cp} \cdot K_m} \quad (3.7)$$

Pokud  $\tau_m$  je  $\ll \tau_a$ , volíme  $\tau_\sigma = \tau_m$  a tím se malé setrvačné členy v rovnici vykrátí. Vznikne tak regulátor proudu je typu PI s přenosem [6]:

$$F_{ri}(p) = \frac{(1+p\tau_a)}{2\tau_m p \cdot \frac{1}{R_a} \cdot K_{cp} \cdot K_m} = \frac{1}{2\tau_m p \cdot \frac{1}{R_a} \cdot K_{cp} \cdot K_m} + \frac{\tau_a}{2\tau_m \cdot \frac{1}{R_a} \cdot K_{cp} \cdot K_m} \quad (3.8)$$

## 3.2 Regulátor otáček stejnosměrného motoru

Regulátor otáček je nadřazený regulátoru proudu, což musíme zahrnout v přenosu celé regulační smyčky. Pro návrh regulátoru otáček platí podobný postup jako pro regulátor proudu. Blok  $F_{r\omega}$  na obrázku 3.4 zastupuje přenos hledaného regulátoru otáček.



Obrázek 3.4: Smyčka regulátoru otáček [6]

Jelikož regulovaná soustava je astatická, pro výpočet přenosu regulátoru otáček použijeme metodu symetrického optima (SO) ve tvaru:

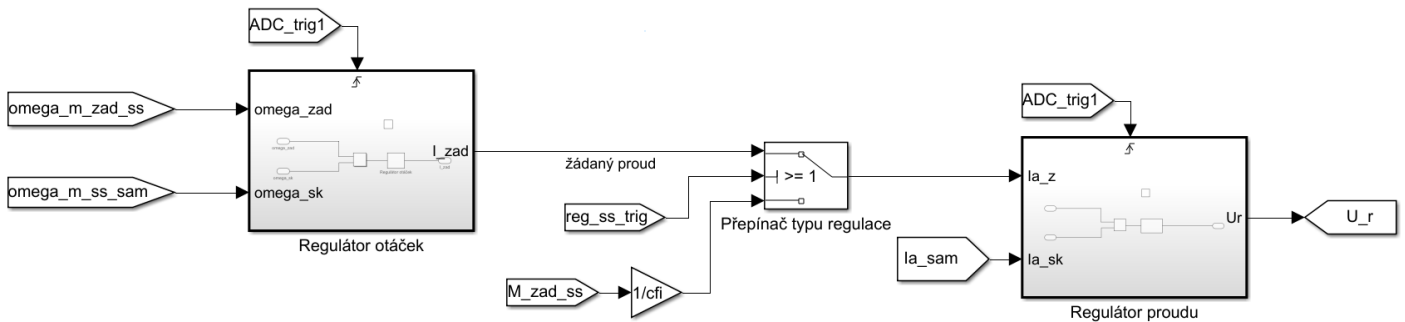
$$F_{SO}(p) = \frac{1+4p\tau_{\sigma}}{8\tau_{\sigma}^2 p^2 (1+p\tau_{\sigma})} \quad (3.9)$$

$$F_{r\omega}(p) = \frac{1+4p\tau_{\sigma}}{8\tau_{\sigma}^2 p^2 (1+p\tau_{\sigma})} \cdot \frac{(2p\tau_m+1)(1+p\tau_{cw}) \cdot pJ}{1/K_{cp} \cdot c_{\phi} \cdot K_{cw}} \quad (3.10)$$

Při zvolení  $\tau_{\sigma} = 2\tau_m + \tau_{cw}$  a při zjednodušení  $K_S = \frac{c_{\phi} \cdot K_{cw}}{K_{cp} \cdot J}$  vznikne finální přenos PI regulátoru otáček  $F_{r\omega}(p)$  [6]:

$$F_{r\omega}(p) = \frac{1+4p\tau_{\sigma}}{8\tau_{\sigma}^2 p \cdot K_S} = \frac{1}{8\tau_{\sigma}^2 p \cdot K_S} + \frac{1}{2\tau_{\sigma} \cdot K_S} \quad (3.11)$$

Na obr. 3.5 je sestaven model regulátorů v programu Simulink, ve kterém je regulátor otáček nadřazen regulátoru proudu. Vstupní veličiny jako je mechanická úhlová rychlost a proud kotvou jsou před vstupem do regulátorů vzorkované s frekvencí nosného signálu 20 kHz. Současně pracují i regulátory otáček a proudu s nosnou frekvencí pomocí triggerování. Model obsahuje přepínač, který volí mezi způsobem řízení. Je možnost regulování stroje na konstantní zadaný moment nebo na konstantní zadané otáčky stroje. Výstupní signál  $U_r$  putuje dále do modulatoru, který je popsán později.



Obrázek 3.5: Model regulátorů v programu simulink

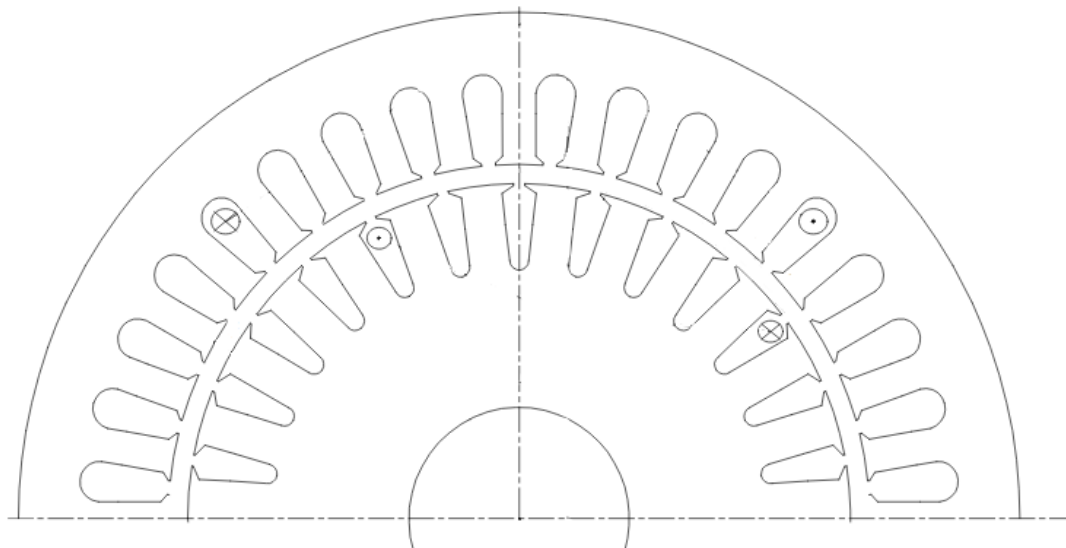
## 4 ASYNCHRONNÍ STROJ

Asynchronní stroje jsou dalším typem elektrických strojů, které dokonce patří mezi ty nejrozšířenější. Tomu vděčí zejména své jednoduché konstrukci, která zvyšuje jeho spolehlivost, a v dnešní době i pokročilým technologiím jako jsou frekvenční měniče, které dokážou provozovat motor v širokém rozsahu otáček. [8]

Stejně jako stejnosměrný stroj se asynchronní stroj skládá ze statoru, což je pevná část, a rotoru, což je otáčivá část. Statorová část magnetického obvodu stroje se skládá ze vzájemně izolovaných plechů o tloušťce většinou 0,5 mm z elektrotechnické oceli zalisovaných do litinové nebo svařované kostry stroje. Na vnitřním obvodu statoru jsou umístěny drážky, které obsahují většinou třífázové vinutí napájené buď přímo ze sítě, nebo z frekvenčního měniče. Toto vinutí je vyvedeno na svorkovnici motoru, kde může být zapojeno do hvězdy nebo trojúhelníka.

Na hřídeli jsou nalisované rotorové plechy, které obsahují rotorové vinutí. Podle typu rotorového vinutí se asynchronní stroje dělí na stroje s vinutým rotorem a s klecí nakrátko. Stroj s vinutým rotorem má vinutí na jednom konci zapojené do hvězdy a druhý konec je připojený na tři sběrací kroužky. Na ty dosedají kartáče, jenž připojují rotorové vinutí většinou k regulačnímu obvodu. Ten se využívá při rozběhu motoru postupnou změnou odporu kotvy.

Asynchronní stroj s klecí nakrátko obsahuje rotorové vinutí ve formě tyčí z mědi, mosazi nebo hliníku, které jsou na obou stranách spojeny dvěma zkratovacími kruhy.



Obrázek 4.1: Řez asynchronním strojem [7]

Při spouštění asynchronního motoru se obecně snažíme o co největší záběrný moment a o co nejmenší záběrný proud. Pokud spouštíme asynchronní motor přímo ze sítě, dochází k velkému nárůstu záběrného proudu způsobeného malou impedancí motoru nakrátko. Běžné hodnoty záběrného proudu dosahují až 8násobku jmenovitého proudu. Tyto velké proudové nárazy vedou k tomu, že na běžnou síť se nyní smí připojovat motory o spouštěcích výkonech přibližně do 3 kW. Pro motory vyšších výkonů se používá různých způsobů, jak záběrné proudy snížit [3].

Existuje několik způsobů, jak snížit proudový náraz při spuštění motorů:

- Spouštění snížením napětí na statoru
  - Pomocí předřazeného odporu nebo tlumivky
  - Pomocí autotransformátoru
  - Pomocí přepínače hvězda-trojúhelník
  - Pomocí řízeného měniče
- Spouštění s pomocí úpravy rotorové klece
  - Použití klece z materiálu s větším měrným odporem
  - Použití vírové klece
  - Použit dvojité klece
- Spouštění pomocí rotorového spouštěče u motorů s vinutým rotorem



Pro tuto diplomovou práci je ovšem nejdůležitějším způsobem rozběhu motoru použití měniče řízeného regulátory. Ty zabezpečují plynulý rozběh, šetří energii a dokážou regulovat velikost napětí při proměnlivém zatížení. V této diplomové práci tuto funkci vykonává třífázový střídač, který bude popsán v kapitole 5. [7][8]

## 4.1 Model asynchronního stroje

Pro řízení asynchronního stroje se používají dynamické modely vzniklé z několika diferenciálních rovnic, které co nejjednodušeji popisují chování jednotlivých veličin. V závislosti na typech použitého řízení, které budou popsány dále, se model asynchronního stroje odvozuje v různých tvarech [9].

### 4.1.1 Prostorový vektor v komplexní rovině

Prostorový vektor v komplexní rovině se používá pro převedení trojfázové soustavy do dvoufázové, a to za účelem snadnějšího popisu soustavy a zrychlení výpočtů. Právě náhradní model asynchronního stroje se kvůli jeho zjednodušení a možnosti regulace využívá veličin ve dvoufázové soustavě [9].

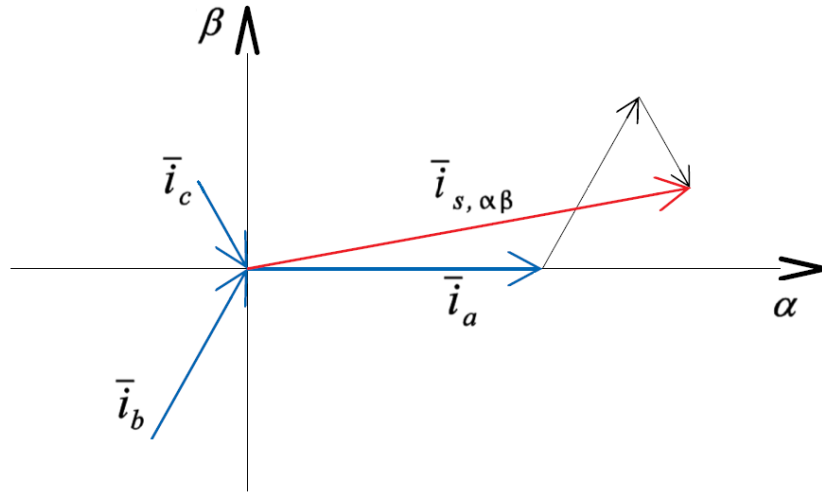
Například pro vyjádření statorového proudu ve dvoufázové soustavě  $i_{s\alpha\beta}$  platí:

$$i_{s\alpha\beta} = C(i_a(t) \cdot a + i_b(t) \cdot a^1 + i_c(t) \cdot a^2) \quad (4.1)$$

, kde  $C$  je transformační konstanta, která respektuje maximální absolutní velikost veličin při převodu do dvoufázové soustavy a má velikost  $2/3$  [9].

Dvoufázovou soustavu, která má svoji reálnou a imaginární osu spjatou napevno se statorem stroje, nazýváme  $\alpha\beta$ . V této soustavě můžeme kromě proudu  $i_{s\alpha}$  a  $i_{s\beta}$  popisovat i jiné veličiny jako je například magnetický tok  $\psi_\alpha$ ,  $\psi_\beta$  a napětí  $u_\alpha$  a  $u_\beta$ . Tuto transformaci nazvanou Clarkova transformace můžeme obecně popsat vztahem:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & -\frac{C}{2} & -\frac{C}{2} \\ 0 & C\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_u \\ x_v \\ x_w \end{bmatrix} \quad (4.2)$$



Obrázek 4.2: Vektory statorových proudů převedené do systému  $\alpha\beta$  [9]

Dalším zjednodušení vztahů je Parkova transformace vektorů svázaných se statorem  $\alpha\beta$  na vektory v rotující souřadnicové soustavě  $kl$ . Tato soustava je spjatá s rotorem a vůči stojícímu statoru rotuje s úhlovou rychlostí  $\omega$ . Do této soustavy se transformují rotorové veličiny asynchronního stroje podle vzorce [9]:

$$\begin{bmatrix} x_k \\ x_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \sin(\theta_r) \\ -\sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

, kde  $\theta_r$  je okamžitý úhel natočení rotoru vůči statoru a je závislý na rychlosti otáčení rotoru  $\omega_r$ :

$$\theta_r = \omega_r \cdot t \quad (4.4)$$

### 4.1.2 Model asynchronního stroje ve formě $\Gamma$ -článku

Po zavedení prostorových vektorů v souřadnicových systémech  $\alpha\beta$  a  $kl$  lze sestavit dvě základní rovnice popisující náhradní model asynchronního stroje:

$$\overrightarrow{u_{sRs,\alpha\beta}} = L_s \frac{d\overrightarrow{i_{s,\alpha\beta}}}{dt} - M \frac{d\overrightarrow{i_{r,\alpha\beta}}}{dt} \quad (4.5)$$

$$\overrightarrow{u_{rRr,kl}} = -L_r \frac{d\overrightarrow{i_{r,kl}}}{dt} + M \frac{d\overrightarrow{i_{s,kl}}}{dt} \quad (4.6)$$

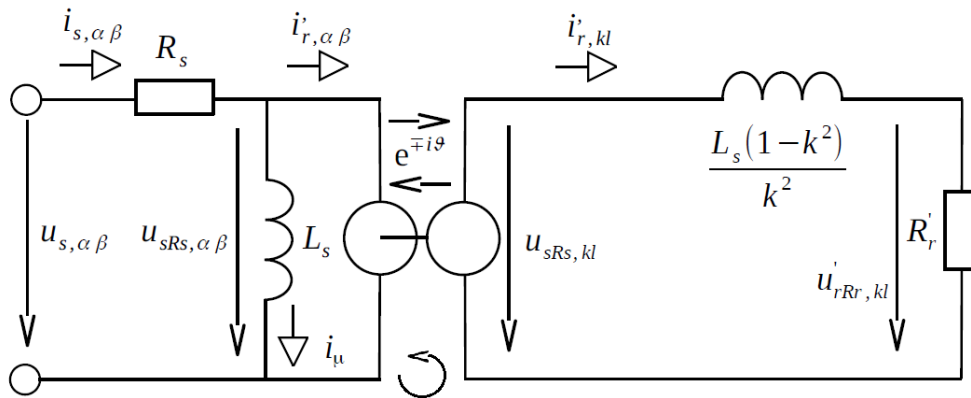
Následným postupným vyjádřením satorového proudu  $i_{s\alpha\beta}$  a rotorového napětí  $u_{rkl}$  na napětí satoru  $u_{s\alpha\beta}$  a proudu rotoru  $i_{rkl}$  vznikne hybridní  $H_u$  matice popisující model asynchronního motoru ve tvaru  $\Gamma$ -článku na obrázku č. 4.5 [9].

$$\begin{bmatrix} i_{s,\alpha\beta} \\ u_{r,kl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} \int (*) dt & k \cdot \sqrt{\frac{L_r}{L_s}} \cdot e^{j\theta} \\ k \cdot \sqrt{\frac{L_r}{L_s}} \cdot \{ [\int (*) dt] \cdot e^{-j\theta} \} & -L_r \cdot (1 - k^2) \frac{d(*)}{dt} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{s,\alpha\beta} \\ i_{r,kl} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

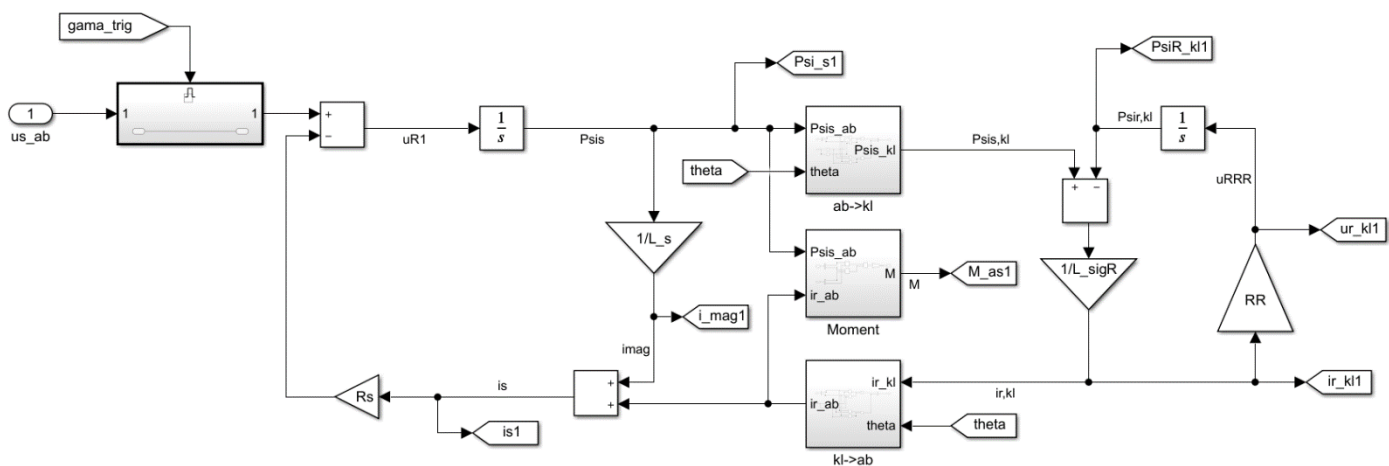
, kde zároveň platí:

$$\frac{M}{L_s} = k \cdot \sqrt{\frac{L_r}{L_s}} \quad (4.8)$$

$$(*) = u_{sRs,\alpha\beta} \quad (4.9)$$



Obrázek 4.3: Model asynchronního stroje ve formě  $\Gamma$ -článku [9]



Obrázek 4.4: Model  $\Gamma$ -članku v programu simulink

### 4.1.3 Model asynchronního stroje ve formě inverzního $\Gamma$ -članku

Při vytvoření náhradního modelu asynchronního modelu ve formě inverzního  $\Gamma$ -članku se využívá stejných rovnic jako ve 4.1.2. Rozdílem je vyjádření  $u_{s\alpha\beta}$  a  $i_{rkl}$  v závislosti na  $i_{s\alpha\beta}$  a  $u_{rkl}$ . Vytvořená hybridní matice  $H_1$  je ve tvaru [9]:

$$\begin{bmatrix} u_{s,\alpha\beta} \\ i_{r,kl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s \cdot (1 - k^2) \frac{d(*)}{dt} & k \cdot \sqrt{\frac{L_s}{L_r}} \cdot \{ [\int (*) dt] \cdot e^{j\theta} \} \\ k \cdot \sqrt{\frac{L_s}{L_r}} \cdot e^{-j\theta} & -\frac{1}{L_r} \int (*) dt \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s,\alpha\beta} \\ u_{r,kl} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

, kde zároveň platí:

$$\frac{M}{L_r} = k \cdot \sqrt{\frac{L_s}{L_r}} \quad (4.11)$$

$$(*) = u_{rRr,kl} \quad (4.12)$$



#### 4.1.4 Model asynchronního motoru v dq souřadnicích

Pro vytvoření řídicích algoritmů je potřeba uvažovat model asynchronního motoru převedený do souřadnic  $dq$ . Použití této soustavy rotující synchronní rychlostí točivého magnetické pole  $\omega_s$  umožní snadnější přístup k základním veličinám a práci s nimi. Z náhradního schématu  $\Gamma$ -článku na obr 4.3 získáme vztahy, které v souřadnicích  $dq$  popisují model takto:

$$\overrightarrow{u_{s,dq}} = R_s \cdot \overrightarrow{i_{s,dq}} + \frac{d\overrightarrow{\psi_{s,dq}}}{dt} + j\omega_s \overrightarrow{\psi_{s,dq}} \quad (4.13)$$

$$\frac{d\overrightarrow{\psi_{s,dq}}}{dt} + j(\omega_s - \omega) \cdot \overrightarrow{\psi_{s,dq}} = L'_{\sigma r} \frac{d\overrightarrow{i'_{r,dq}}}{dt} + j(\omega_s - \omega) \cdot L'_{\sigma r} \cdot \overrightarrow{i'_{r,dq}} + R_r \cdot \overrightarrow{i'_{r,dq}} \quad (4.14)$$

$$\frac{\overrightarrow{\psi_{s,dq}}}{L_s} = \overrightarrow{i_{s,dq}} - \overrightarrow{i'_{r,dq}} \quad (4.15)$$

$$\frac{d\overrightarrow{\psi'_{r,dq}}}{dt} + j(\omega_s - \omega) \cdot \overrightarrow{\psi'_{r,dq}} = R'_r \cdot \overrightarrow{i'_{r,dq}} \quad (4.16)$$

Pokud zavedeme předpoklad, že statorový tok bude orientován pouze do osy  $d$ , můžeme vyjádřit složky napětí zvlášť v ose  $d$  a  $q$  jak je na obr. 4.7 a 4.8 [9].

$$\overrightarrow{\psi_{sd}} = \overrightarrow{\psi_s} \quad (4.17)$$

$$\overrightarrow{\psi_{sq}} = 0 \quad (4.18)$$

$$\overrightarrow{i_{s,d}} = \overrightarrow{i_{r,d}} \quad (4.19)$$

Pro osu  $d$  platí:

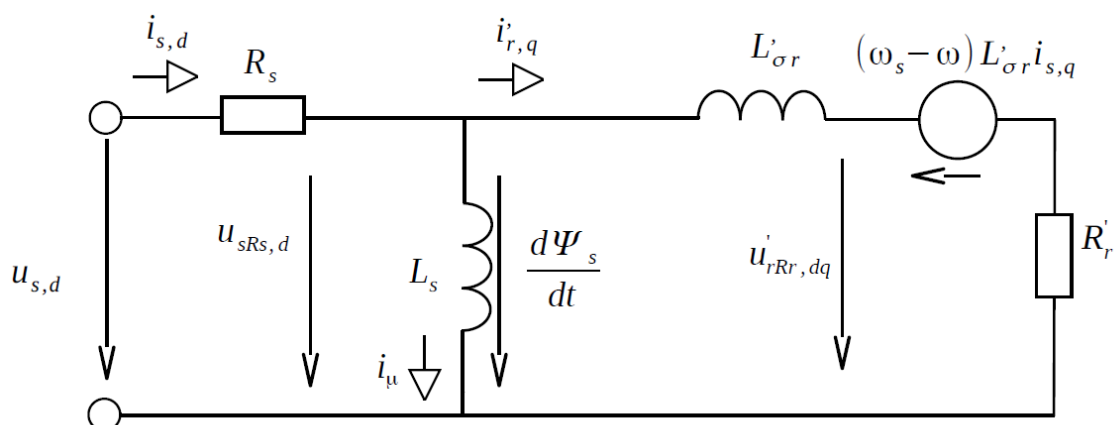
$$\overrightarrow{u_{s,d}} = R_s \cdot \overrightarrow{i_{s,d}} + \frac{d\overrightarrow{\psi_s}}{dt} \quad (4.20)$$

$$\overrightarrow{u_{s,d}} = R_s \cdot \overrightarrow{i_{s,d}} + L'_{\sigma r} \frac{d\overrightarrow{i'_{r,d}}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot L'_{\sigma r} \cdot \overrightarrow{i'_{r,d}} + R'_r \cdot \overrightarrow{i'_{r,d}} \quad (4.21)$$

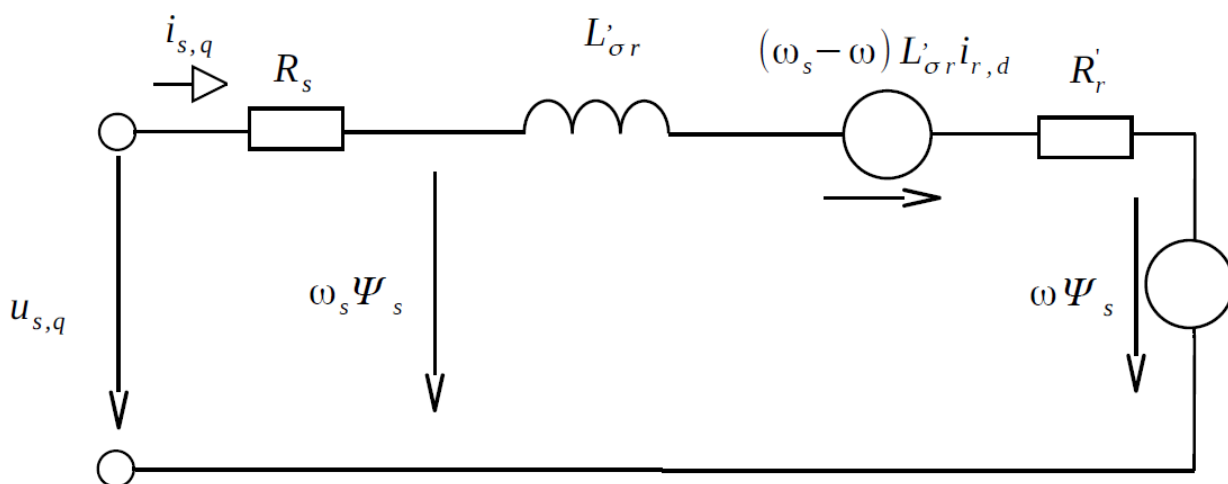
Pro osu  $q$  platí:

$$\overrightarrow{u_{s,q}} = R_s \cdot \overrightarrow{i_{s,q}} + \omega_s \cdot \overrightarrow{\psi_s} \quad (4.22)$$

$$\overrightarrow{u_{s,q}} = R_s \cdot \overrightarrow{i_{s,q}} + L'_{\sigma r} \frac{d\overrightarrow{i'_{s,q}}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot L'_{\sigma r} \cdot \overrightarrow{i'_{r,d}} + R'_r \cdot \overrightarrow{i'_{s,q}} + \omega \cdot \overrightarrow{\psi_s} \quad (4.23)$$



Obrázek 4.7: Náhradní schéma  $\Gamma$ -článku asynchronního stroje v ose  $d$  [9]



Obrázek 4.8: Náhradní schéma  $\Gamma$ -článku asynchronního motoru v ose  $q$  [9]

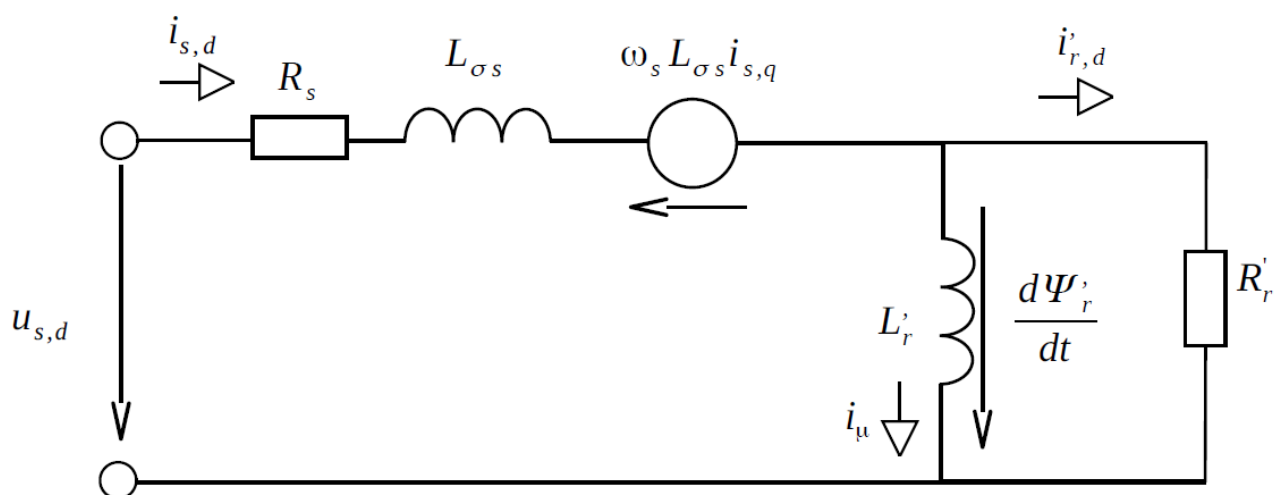
Obdobným způsobem a zavedením předpokladu, že rotorový tok je též orientován do osy  $d$ , můžeme odvodit vztahy popisující asynchronní motor v podobě inverzního  $\Gamma$ -článku v ose  $d$  a  $q$ . Pro osu  $d$  inverzního  $\Gamma$ -článku platí:

$$\overrightarrow{u_{s,d}} = R_s \cdot \overrightarrow{i_{s,d}} + L_{\sigma s} \frac{d\overrightarrow{i_{s,d}}}{dt} - \omega_s \cdot L_{\sigma s} \cdot \overrightarrow{i_{s,q}} + \frac{d\overrightarrow{\psi_r'}}{dt} \quad (4.24)$$

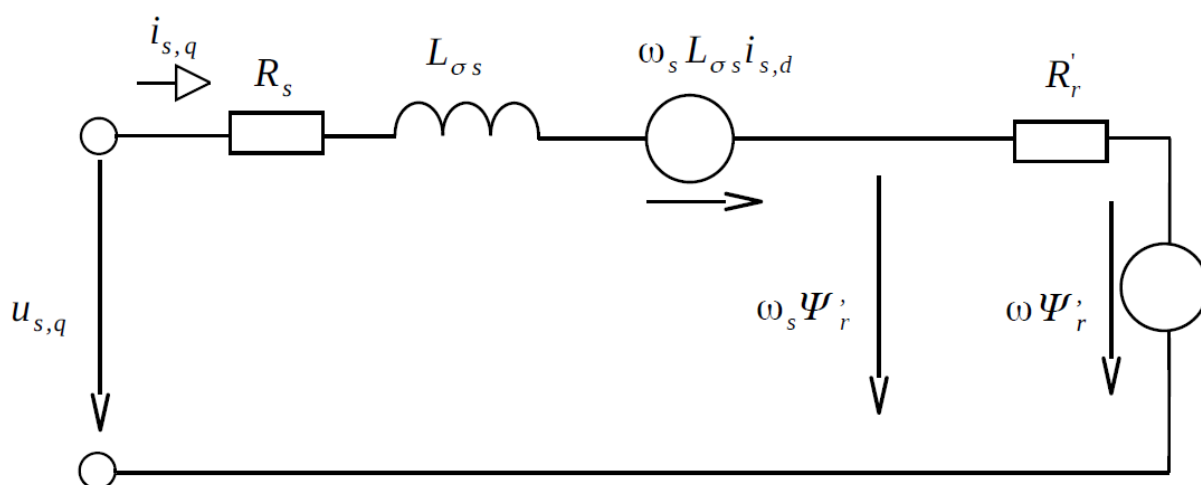
$$\frac{d\overrightarrow{\psi_r'}}{dt} = R_r' \cdot \overrightarrow{i_{r,d}} \quad (4.25)$$

Pro osu  $q$  inverzního  $\Gamma$ -člátku platí:

$$\overrightarrow{u_{s,q}} = R_s \cdot \overrightarrow{i_{s,q}} + L_{\sigma s} \frac{d\overrightarrow{i_{s,q}}}{dt} + \omega_s \cdot L_{\sigma s} \cdot \overrightarrow{i_{s,d}} + \omega_s \cdot \overrightarrow{\psi_r'} \quad (4.26)$$



Obrázek 4.9: Náhradní schéma inverzního  $\Gamma$ -člátku asynchronního motoru v ose  $d$  [9]



Obrázek 4.10: Náhradní schéma inverzního  $\Gamma$ -člátku asynchronního motoru v ose  $q$  [9]



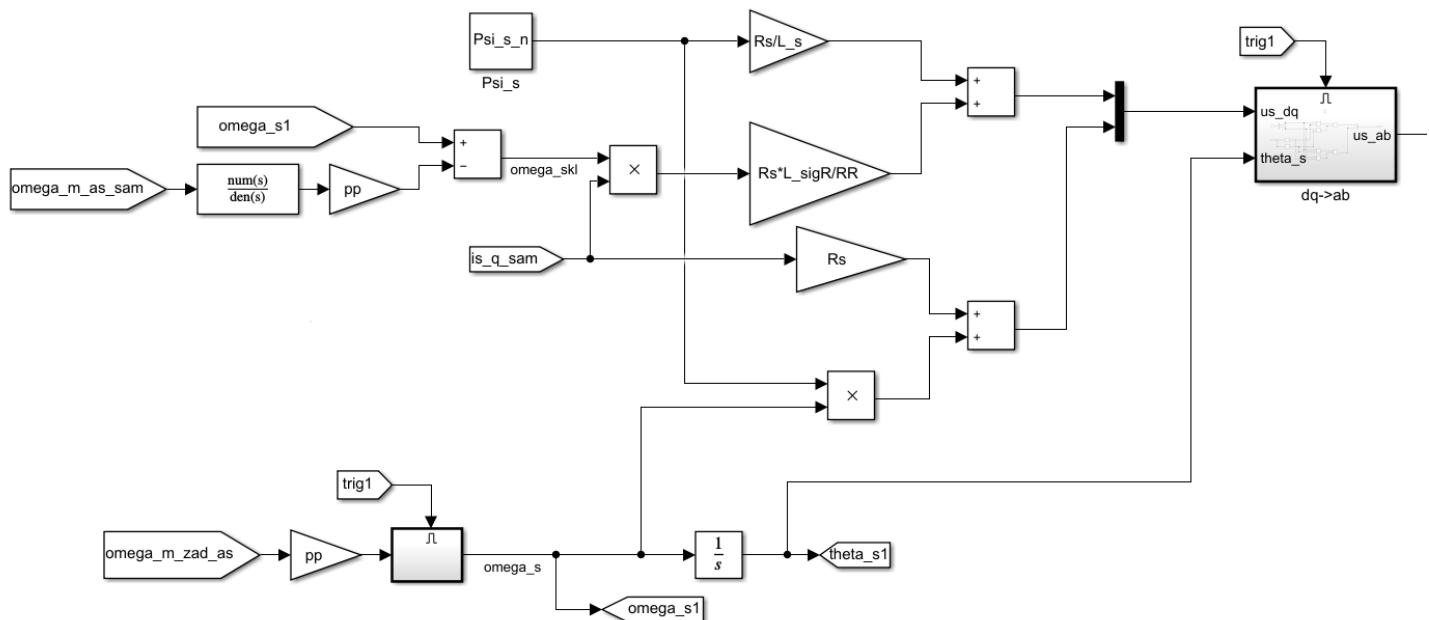
## 4.2 Řízení asynchronního stroje

Existuje několik způsobů řízení asynchronního stroje, které se od sebe odlišují použitými algoritmy. V simulacích této diplomové práce budou použity 3 běžně používané způsoby řízení, a to skalární řízení otáček, skalární řízení momentu a vektorové řízení otáček. Odlišují se od sebe zejména celkovou dynamikou, přesností a závislostí regulovaných veličin.

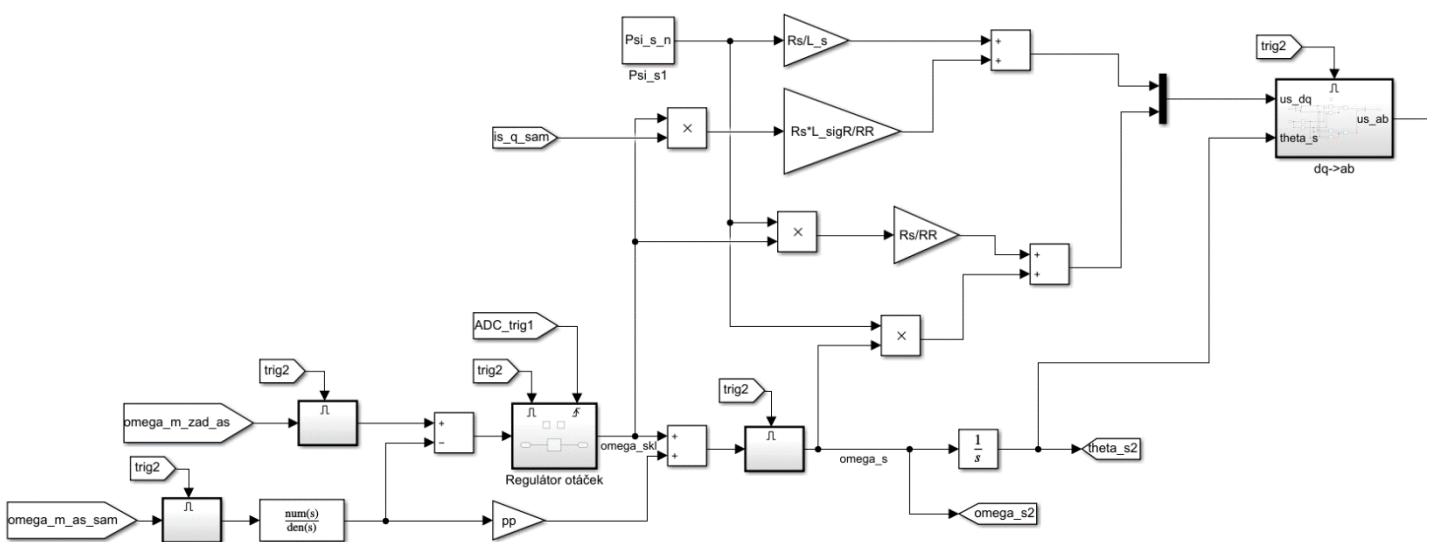
### 4.2.1 Skalární řízení

Skalární řízení neboli také řízení na konstantní poměr  $U/f$  je ze všech zmíněných ten nejjednodušší typ. Oproti ostatním se vyznačuje menší přesností a dynamikou. Díky své jednoduchosti je používáno zejména v levných pohonech jako jsou například ventilátory a čerpadla, kde nejsou velké nároky na dynamiku. Princip spočívá v udržování konstantního magnetického toku  $\psi$ . Toho se dosahuje udržováním konstantního poměru napětí ku frekvenci. Pokud pomineme skluzovou frekvenci, je úhlová rychlost otáčení hřídele úměrná frekvenci statorového napětí. Konstantní spřažený magnetický tok  $\psi$  je ovšem možné udržovat pouze do jmenovitých otáček stroje, kdy je dosaženo maximálního možného statorového napětí, které je limitováno napětím meziobvodu. Při dalším zvyšování frekvence, a tedy i otáček stroje dochází k odbuzování stroje.

V práci jsou sestaveny regulační obvody skalární řízení otáček s orientací na statorový tok s otevřenou smyčkou na obr. 4.11 a se zpětnou vazbou měřením mechanické úhlové rychlosti  $\omega_m$  na obr. 4.12. V poslední řadě je na obr. 4.13 sestaven model řízení pro skalární regulaci momentu v otevřené smyčce, kde jedinou vstupní veličinou je žádaný moment. Ve všech případech je výstupní veličinou modulační signál ve formě  $u_{s\alpha\beta}$ .

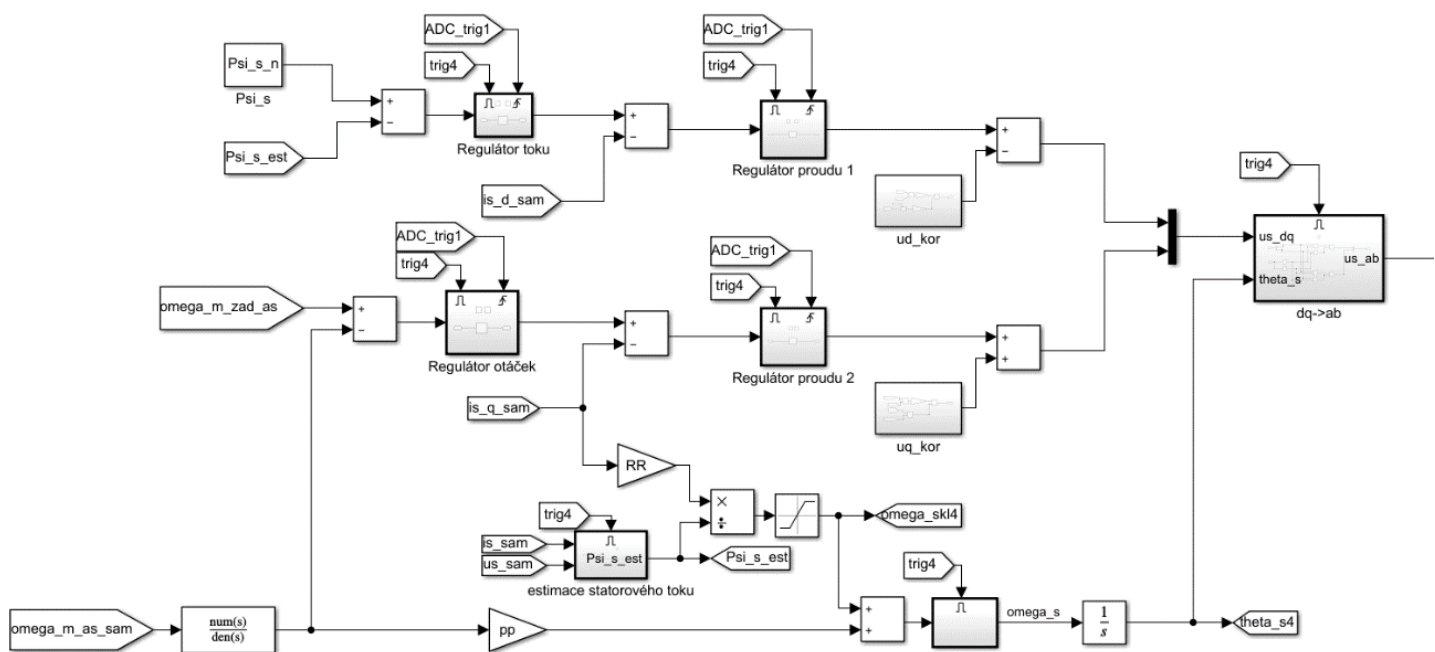


Obrázek 4.11: Regulační model skalárního řízení otáček v otevřené smyčce

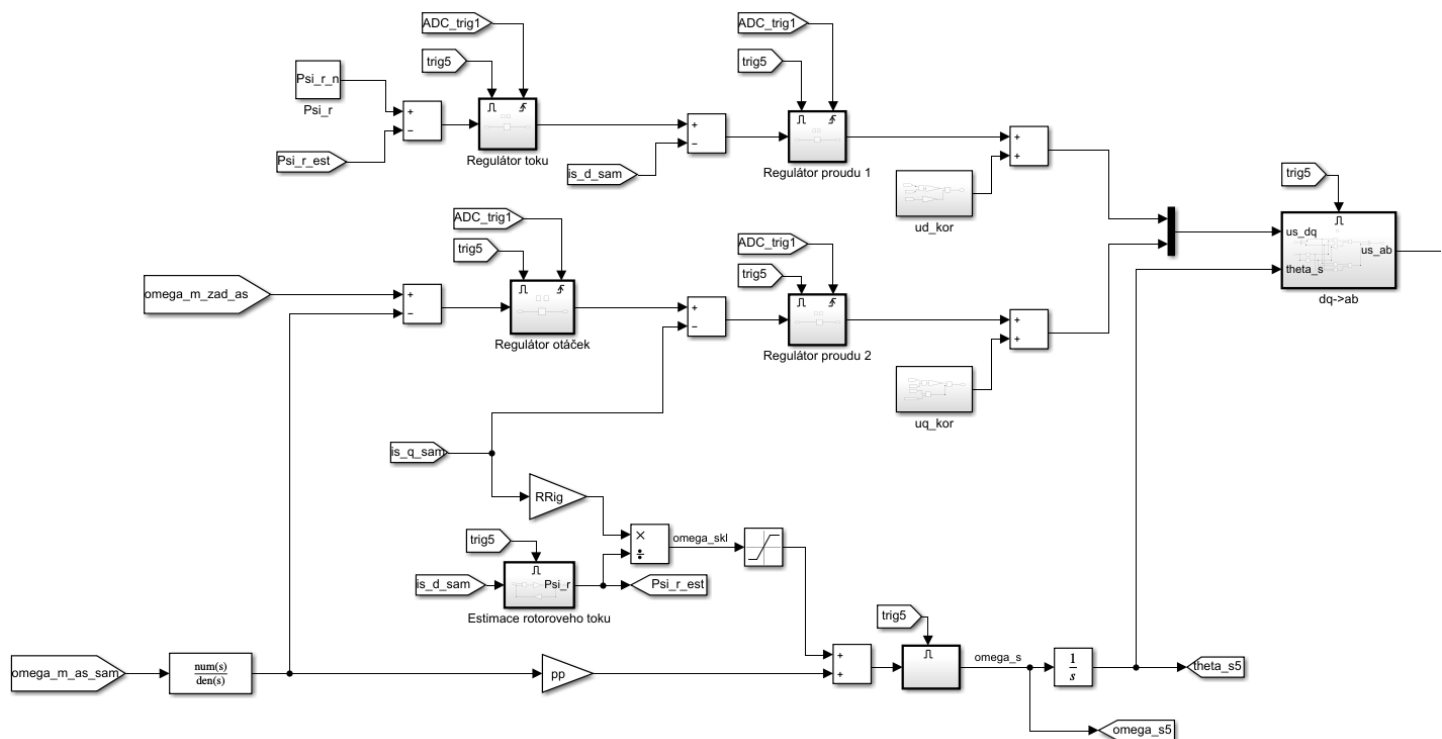


Obrázek 4.12: Regulační model skalárního řízení otáček se zpětnou vazbou





Obrázek 4.14: Regulační model vektorového řízení statorového toku



Obrázek 4.15: Regulační model vektorového řízení rotorového toku

### 4.3 Regulátory asynchronního stroje

Při řízení stroje metodou skalárního i vektorového řízení je za potřebí několika regulátorů, jejichž přenos musí být navrhnut tak, aby rychlost odezvy a odchylka regulujících veličin byla co neoptimálnější. Vysoké nároky na regulátor klade zejména vektorové řízení, které musí být přesnější a rychlejší.

Při postupu návrhu regulátoru proudu se postupovalo stejným způsobem jako je tomu v kapitole 3.1. Jedinou výjimkou je použití přenosu asynchronního motoru s využitím Laplaceovi transformace [9]:

$$U_{sd}(p) = R_e \cdot I_{sd}(p) + pL'_{\sigma r} \cdot k^2 \cdot I_{sd}(p) \quad (4.27)$$

$$U_{sq}(p) = R_e \cdot I_{sq}(p) + pL'_{\sigma r} \cdot k^2 \cdot I_{sq}(p) \quad (4.28)$$

, kde pro celkový odpor s orientací na statorový tok  $R_e$  platí:

$$R_e = R_s + R'_r \cdot k^2 \quad (4.29)$$

V případě orientace spřaženého toku na rotor platí pro celkový odpor  $R_e$ :

$$R_e = R_s + R'_r \cdot k^4 \quad (4.29)$$

Následně přenosová funkce proudu v obou osách  $d$  a  $q$  je stejná a má tvar:

$$F_{si}(p) = \frac{1/R_e}{1+p\tau_{di}} \quad (4.30)$$

$$\tau_i = \frac{L'_{\sigma r} \cdot k^2}{R_e} \quad (4.31)$$

Dále je použita metoda optimálního modulu a ze znalostí zesílení  $K_m$  a časové konstanty měniče  $\tau_m$  a také zesílení čidla proudu  $K_{cp}$  je určen přenos regulátoru proudu, který je pro osu  $d$  a  $q$  totožný a má PI tvar [9]:

$$F_{ri}(p) = \frac{1}{2\tau_m p \cdot \frac{1}{R_e} \cdot K_{cp} \cdot K_m} + \frac{\tau_i}{2\tau_m \cdot \frac{1}{R_e} \cdot K_{cp} \cdot K_m} \quad (4.32)$$

V případě výpočtu regulátoru otáček je postup výpočtu stejný jako v kapitole 3.2 pro stejnosměrný motor. Výsledkem je přenos PI regulátoru otáček:

$$F_{r\omega}(p) = \frac{1}{8\tau_\sigma^2 p \cdot K_S} + \frac{1}{2\tau_\sigma \cdot K_S} \quad (4.33)$$

, kde pro  $K_S$  a v závislosti na regulaci statorového nebo rotorového toku pro  $c_\phi$  platí:

$$K_S = \frac{c_\phi \cdot K_{cw}}{K_{cp} \cdot J} \quad (4.33)$$

$$C_\phi = \frac{3}{2} \cdot pp \cdot \psi_s \quad (4.34)$$

$$C_\phi = \frac{3}{2} \cdot pp \cdot \psi_r \quad (4.35)$$

Regulátoru proudu osy  $d$  je nadřazen regulátor statorového nebo rotorového spřaženého magnetického toku, který reguluje velikost estimovaného toku na velikost žádanou. Pro výpočet regulátoru statorového toku je potřeba přenos statorového toku [9]:

$$F_{\psi_s}(p) = \frac{\psi_s(p)}{I_s(p)} = \frac{L_s}{p\tau_\psi + 1} \quad (4.36)$$

$$\tau_{\psi_s} = \frac{L_s}{R'_r \cdot k^2} \quad (4.37)$$

Vzniklý PI regulátor statorového toku má tvar:

$$F_{r\psi_s}(p) = \frac{1}{2\tau_i p \cdot L_s \cdot \frac{1}{K_{cp}}} + \frac{\tau_{\psi_s}}{2\tau_i \cdot L_s \cdot \frac{1}{K_{cp}}} \quad (4.38)$$

Pro výpočet regulátoru rotorového toku jsou vztahy podobné:

$$F_{\psi_r}(p) = \frac{\psi_s(p)}{I_s(p)} = \frac{L'_r}{p\tau_{\psi} + 1} \quad (4.39)$$

$$\tau_{\psi_r} = \frac{L'_r}{R'_r \cdot k^4} \quad (4.40)$$

Vzniklý PI regulátor rotorového toku má tvar:

$$F_{r\psi_r}(p) = \frac{1}{2\tau_i p \cdot L'_r \cdot \frac{1}{K_{cp}}} + \frac{\tau_{\psi_r}}{2\tau_i \cdot L'_r \cdot \frac{1}{K_{cp}}} \quad (4.41)$$

#### 4.4 Výpočty parametrů asynchronního stroje

Pro simulaci bylo potřeba vypočítat náhradní parametry asynchronního stroje ve formě  $\Gamma$ -článku a inverzního  $\Gamma$ -článku, a to z hodnot ze štítku motoru a naměřených hodnot na skutečném standu.

$$\begin{aligned} \psi_s &= \frac{1}{\omega_s} \cdot \sqrt{u_{s0}^2 - (R_s \cdot i_{sd0})^2} = \\ &= \frac{1}{2\pi \cdot 50} \cdot \sqrt{\left(\frac{24 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right)^2 - (0,35 \cdot 6 \cdot \sqrt{2})^2} = 62 \text{ mWb} \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$L_s = \frac{\psi_s}{i_{s0}} = \frac{0,062}{6 \cdot \sqrt{2}} = 7,3 \text{ mH} \quad (4.43)$$

Ze jmenovitého napětí a proudu motoru byl odhadnut jmenovitý spřažený statorový tok  $\psi_{sn} = 52 \text{ mWb}$ . Pomocí tohoto toku a jmenovitého momentu lze vypočítat momentotvorný proud  $i_{sqn}$  [9]:

$$i_{sqn} = \frac{2}{3} \cdot M_n \frac{1}{p \cdot \psi_{sn}} = \frac{2}{3} \cdot 1,3 \frac{1}{2 \cdot 0,052} = 8,33 \text{ A} \quad (4.44)$$

$$i_{sdn} = \sqrt{i_{sn}^2 - i_{sqn}^2} = \sqrt{(9,37 \cdot \sqrt{2})^2 - 8,33^2} = 10,3 \text{ A} \quad (4.45)$$

$$i'_{rd} = i_{sdn} - \frac{\psi_{sn}}{L_s} = 10,3 - \frac{0,052}{7,3 \cdot 10^{-3}} = 3,14 \text{ A} \quad (4.46)$$

Ze známých proudů  $\Gamma$ -článku lze vypočítat rotorový odpor a rozptylovou indukčnost stroje:

$$R'_r = \frac{\omega_{skluz} \cdot \psi_s}{i_{sqn} + \frac{i_{rdn}}{i_{sqn}}} = \frac{2\pi \frac{150}{60} \cdot 0,052}{8,33 + \frac{3,14^2}{8,33}} = 85,8 \text{ m}\Omega \quad (4.47)$$

$$L'_{\sigma r} = \frac{R'_r \cdot i'_{rd}}{\omega_{skluz} \cdot i_{sqn}} = \frac{0,0858 \cdot 3,14}{2\pi \frac{150}{60} \cdot 7} = 2,1 \text{ mH} \quad (4.48)$$

$$k = \sqrt{\frac{L_s}{(L_s + L'_{\sigma r})}} = \sqrt{\frac{7,3 \cdot 10^{-3}}{(7,3 \cdot 10^{-3} + 2,1 \cdot 10^{-3})}} = 0,8826 \quad (4.49)$$

$$L'_{\sigma s} = L_s \cdot (1 - k^2) = 7,3 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,8826^2) = 1,6 \text{ mH} \quad (4.50)$$



$$R'_{rig} = R'_r \cdot k^4 = 0,086 \cdot 0,8826^4 = 52,1 \text{ m}\Omega \quad (4.51)$$

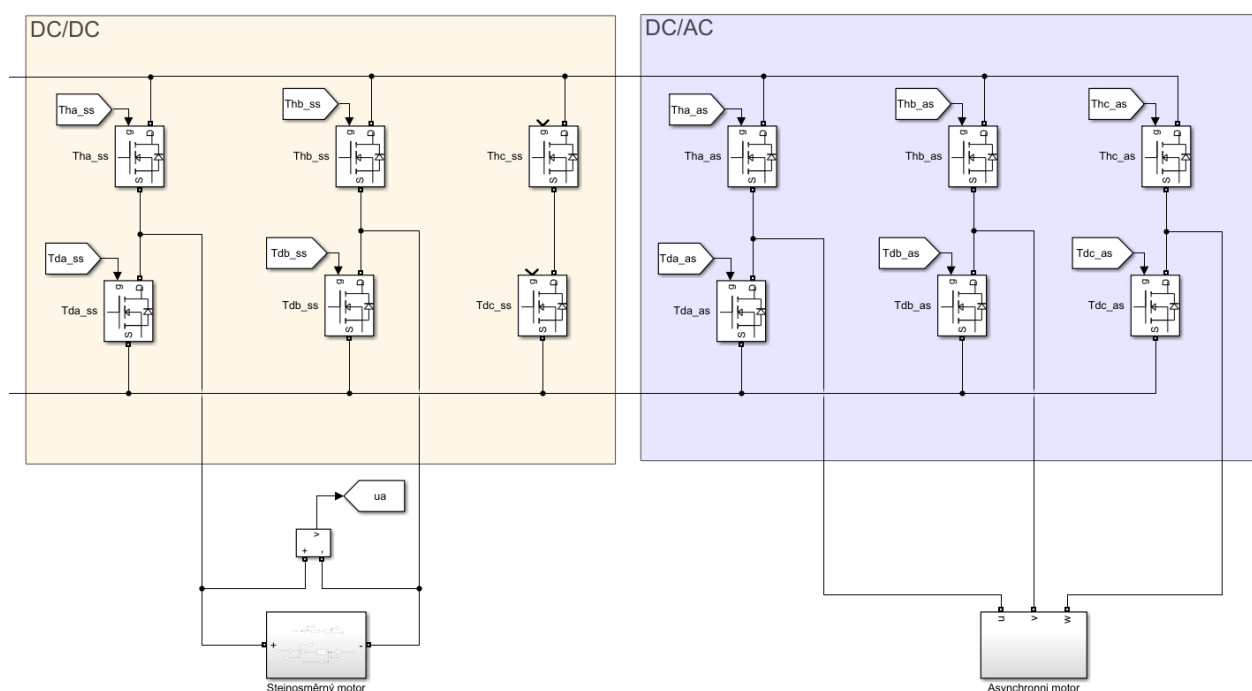
$$L'_r = L_s \cdot k^2 = 7,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8826^2 = 5,7 \text{ mH} \quad (4.52)$$

Nakonec lze vypočítat jmenovitý rotorový tok  $\psi_{rn}$ :

$$\begin{aligned} \psi_{rn} &= (i_{sdn} - i'_{rd}) \cdot L'_r = \\ (10,3 - 3,14) \cdot 5,7 \cdot 10^{-3} &= 40,5 \text{ mWb} \end{aligned} \quad (4.53)$$

## 5 PULZNÍ MĚNIČE

Okamžitá hodnota napětí na svorkách obou motorů je řízena dvěma topologicky identickými pulzními měniči, jak lze vidět na obr. 5.1. V případě napájení stejnosměrného motoru se jedná o čtyřkvadrantový pulzní měnič DC/DC, u kterého jsou aktivní pouze dvě ze tří větví. Každá větev se skládá ze dvou tranzistorů MOSFET s antiparalelně zapojenými nulovými diodami. Topologie pulzního měniče DC/AC tedy trojfázový střídač, přes který je napájen asynchronní motor, se nijak neliší od čtyřkvadrantového pulzního měniče. Jediným rozdílem je způsob řízení těchto měničů. [10]



Obrázek 5.1: Pulzní měniče v programu simulink

## 5.1 Pulzní šířková modulace pro pulzní měnič

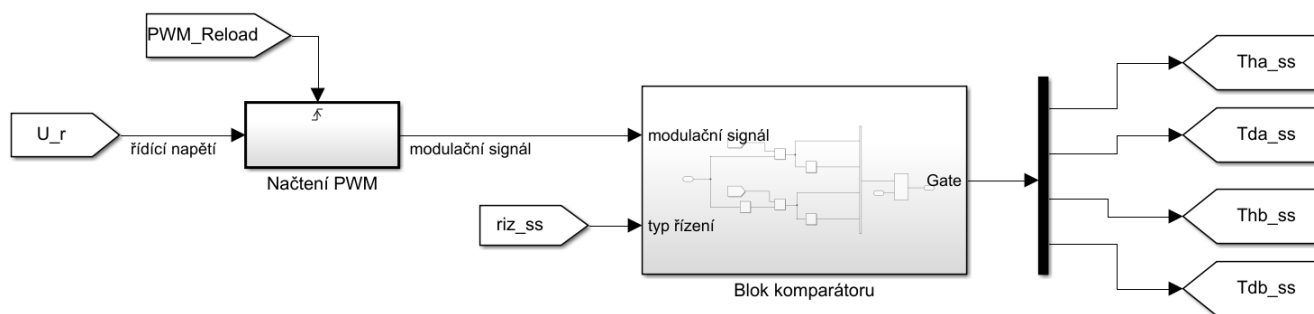
Spínání polovodičových prvků funguje na principu pulzní šířkové modulace (PWM). Jedná se o vytvoření vysokofrekvenčního modulačního obdélníkového signálu, který je přiváděn na čtveřici nebo šestici řídících elektrod tranzistorů pulzního měniče. Signál vzniká v pulzním šířkovém modulátoru, který porovnává v komparátoru nosný signál s modulačním signálem.

Jako nosný signál je použit vysokofrekvenční trojúhelníkový signál o frekvenci 20 kHz. V případě řízení stejnosměrného motoru vzniká modulační signál v regulátoru proudu a má tvar pomalu se měnícího stejnosměrného signálu. V případě řízení asynchronního stroje s trojfázovým střídačem se využívá sinusové PWM. [10]

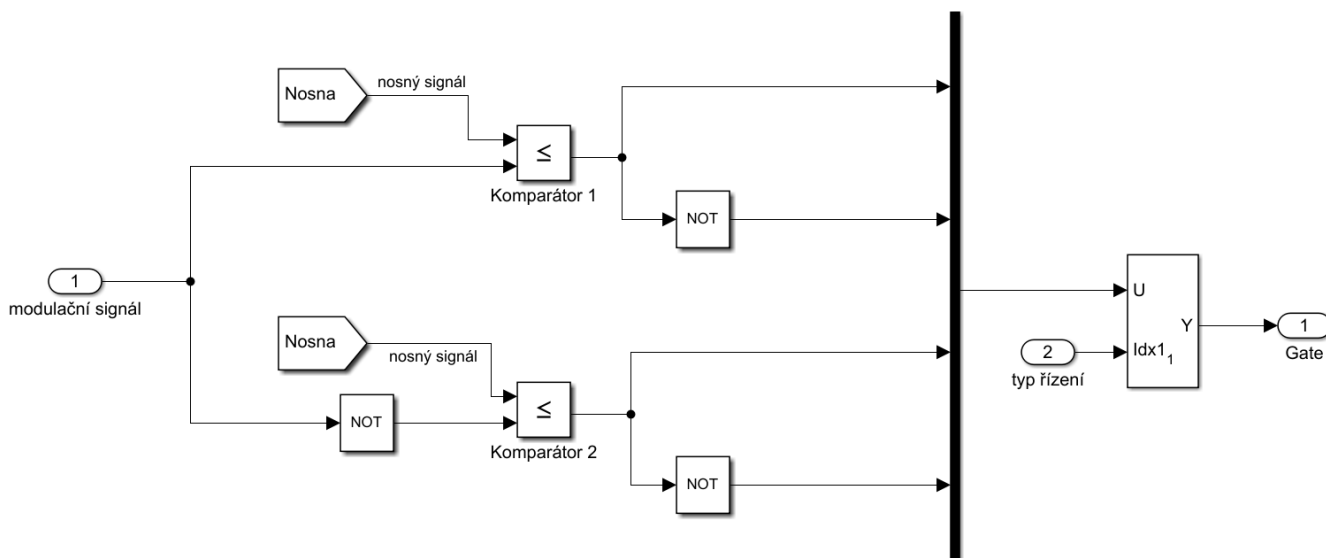
Podle algoritmu PWM lze řízení systému dělit na bipolární a unipolární. V případě bipolárního řízení nabývá napětí střídavě hodnot  $\pm U_d$ . V případě unipolárního řízení obsahuje řídící elektronika dva komparátory, které porovnávají nosný signál s modulačním signálem a převráceným modulačním signálem. Vzniknou tedy dva modulační signály, které obsahují vlastní sekvenční logiku a ovládají vlastní větve měniče. Ačkoliv v obou případech řízení má proud zátěže stejnou střední hodnotu proudu  $I_z$  i napětí  $U_z$ , zvlnění proudu je v případě unipolárního řízení poloviční. Zároveň dochází i ke zdvojení kmitočtu na zátěži vůči frekvenci tranzistorů, což vede ke snížení přepínacích ztrát tranzistorů, protože můžeme snížit frekvenci spínání na polovinu. V případě unipolárního řízení dochází i ke zmenšení špičkové hodnoty proudu, což vede k lepšímu dimenzování tranzistorů a diod v měniči. V poslední řadě dochází i ke zmenšení efektivní hodnoty mezilehlého proudu při unipolárním řízení než při řízení bipolárním. [10]

Aby se prostorový vektor výstupního napětí z bloku regulace  $u_{\alpha\beta}$  pohyboval v jednotkové kruhové oblasti, je omezena jeho absolutní hodnota na jednotkovou velikost se zachováním jeho směru. Toto omezení je provedeno ještě před výpočtem v modulátoru. Modulační činitel se tak stává 1. [11]

Na obrázku 5.2 je model řídicí elektroniky pro řízení čtyřkvadrantového pulzního měniče vytvořený v programu Simulink. Modulační signál vznikl ze signálu  $U_r$  z výstupu regulátoru proudu na obrázku 3.5. Signál je načítán pomocí bloku „Načtení PWM“ s frekvencí nosného signálu, která je 20 kHz. Blok komparátoru na obrázku 5.3 obsahuje dva komparátory, které vytváří modulační signály pro tranzistory. Jaké signály budou přivedeny na řídicí elektrody tranzistorů, a tedy o jaký typ řízení se bude jednat, je dáno přepínačem řízení reagující na nastavení simulace.



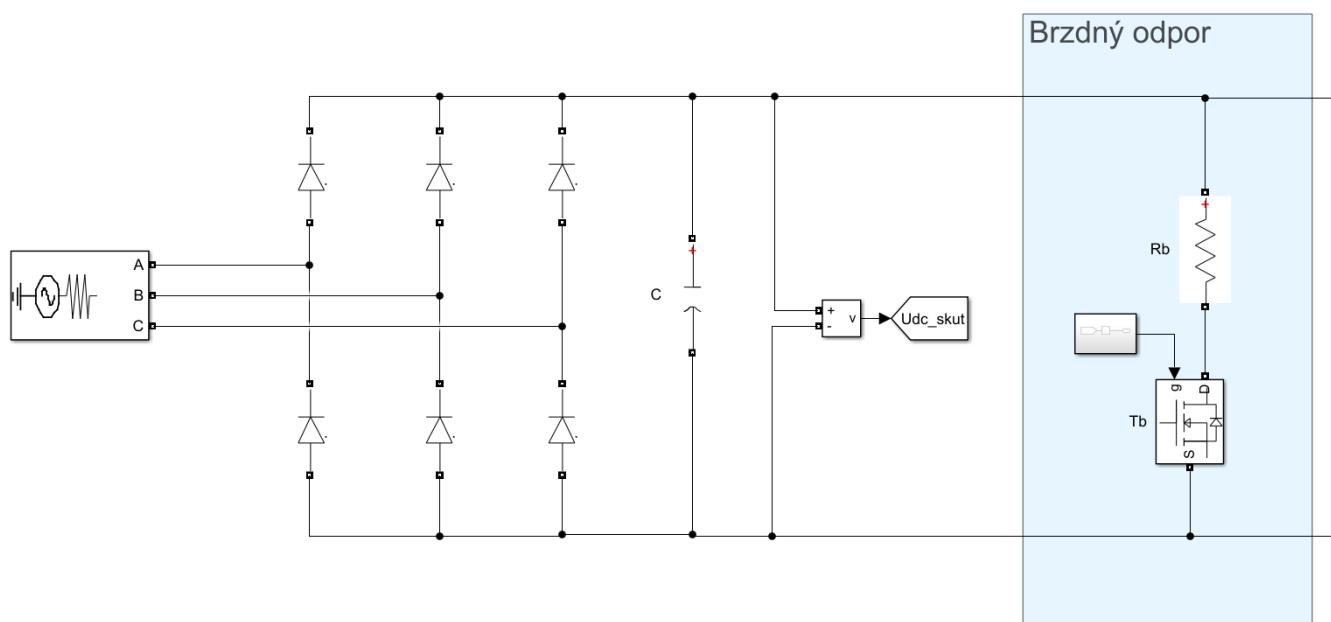
Obrázek 5.2: Modulátor čtyřkvadrantového pulzního měniče



Obrázek 5.3: Blok komparátoru čtyřkvadrantového pulzního měniče

Oba měniče jsou připojeny ke stejnosměrnému mezilehlému obvodu s celkovou kapacitou 7 mF a špičkovou hodnotou napětí 34 V. Napětí meziobvodu vzniká usměrněním trojfázové sítě šestipulzním usměrňovačem.

V případě práce jednoho ze strojů v generátorickém režimu obsahuje stejnosměrný meziobvod brzdný odpor  $R_B$ , tak aby napětí meziobvodu nepřekročilo 34 V. Připojování tohoto odporu obstarává tranzistor  $T_B$ .



Obrázek 5.4: Usměrňovač s brzdným odporem

## 6 OVLÁDÁNÍ SIMULACE

Veškeré ovládání simulací probíhá zadáváním žádaných otáček, případně momentu, v levé horní části modelu. V případě tabulky související s nastavením stejnosměrného stroje, lze zvolit, zda měnič bude pracovat v bipolárním či unipolárním režimu a zda stroj bude regulován na konstantní otáčky nebo moment. Lze též zvolit trend žádaných otáček či momentu, a to buď ve formě skokového zvýšení na určenou hodnotu v určitý čas simulace, či formou lineárního nárůstu veličiny po určitou dobu. Totéž platí v případě nastavení asynchronního stroje. U asynchronního stroje zde přibývá možnost zvolení typu řízení. Na dané nastavení reaguje jednoduchá logika, která připojuje jednotlivé modely strojů a řídicí schémata.

**Zvolte nastavení pro stejnosměrný stroj**

Zvolte typ řízení  
Unipolární řízení

Zvolte typ regulace  
Konstantní moment

Zvolte trend nárůstu veličiny  
Rampa

Zadejte žádané otáčky [ot/min]  
50

Zadejte počátek vstupu [s]  
0.1

Zadejte dobu nárůstu v případě rampy [s]  
0.5

Zadejte žádaný moment [Nm]  
0

Zadejte počátek vstupu [s]  
0.1

Zadejte dobu nárůstu v případě rampy [s]  
0.5

**Zvolte nastavení pro asynchronní stroj**

Zvolte typ regulace  
Skalární regulace zpětnovaz...

Zvolte trend nárůstu veličiny  
Skokový nárůst

Zadejte žádané otáčky [ot/min]  
100

Zadejte počátek vstupu [s]  
0.05

Zadejte dobu nárůstu v případě rampy [s]  
0.5

Zadejte žádaný moment [Nm]  
1

Zadejte počátek vstupu [s]  
0.05

Zadejte dobu nárůstu v případě rampy [s]  
1

Obrázek 6.1: Tabulky pro nastavení simulace

## 7 VÝSLEDKY SIMULACE

Bylo změřeno celkem 6 simulací s různými nastaveními, která ukazují chování veličin v různých režimech práce standu. Základním účelem simulací bylo zjištění správné funkce celého systému, zejména pak vzájemné ovlivňování strojů.

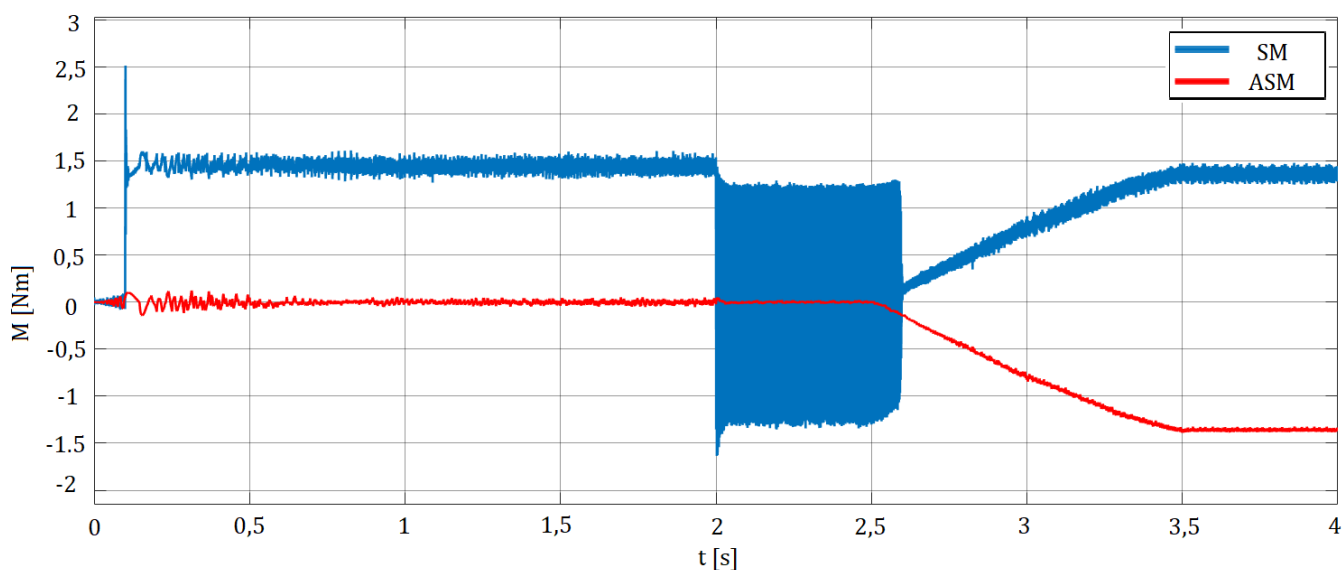
### 7.1 Rozběh SM a zatěžování od 0 - $M_n$

Během této simulace je demonstrována funkce regulátoru otáček stejnosměrného motoru. Stejnosměrný motor je bez zatížení rozbíhán na otáčky  $1350 \text{ min}^{-1}$ . Jakmile dosáhne těchto otáček, asynchronní motor postupně zvětšuje zátěž až na jmenovitou hodnotu momentu  $M_n$  1,3 Nm.

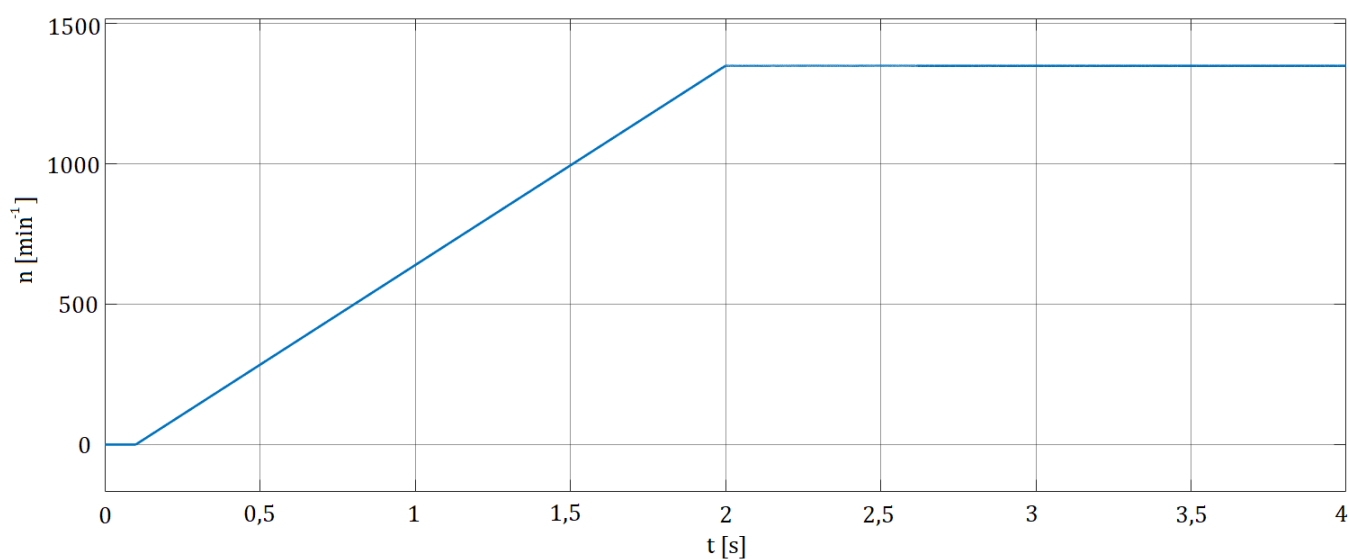
Z výsledků níže lze vidět, že v čase 0,1 s byl nastaven požadavek pro stejnosměrný motor na zrychlení na  $1350 \text{ ot./min}$ . Jelikož je požadován lineární nárůst otáček, vyvolaný moment je kromě počátečního překmitu konstantní a po ustálení nabývá hodnoty 1,45 Nm, což odpovídá proudu kotvou stejnosměrného motoru zhruba 25 A.

V čase simulace 2 sekundy dochází k dosažení požadovaných otáček, a jelikož zátěžný moment je nulový, i moment stejnosměrného motoru klesne na 0 Nm ovšem s velkým zvlněním. Od času 2,5 sekundy dochází k téměř lineárnímu nárůstu momentu SM, který je způsoben zatěžováním asynchronním motorem. Z důvodu řízení momentu asynchronního stroje v otevřené smyčce, dochází k ustálené chybě zhruba 0,06 Nm.

Z obrázku 7.2 lze vidět, že otáčky se po ustálení drží na konstantní hodnotě. Z toho plyne, že zátěžný moment je dokonale vyregulován regulátorem otáček stejnosměrného motoru.



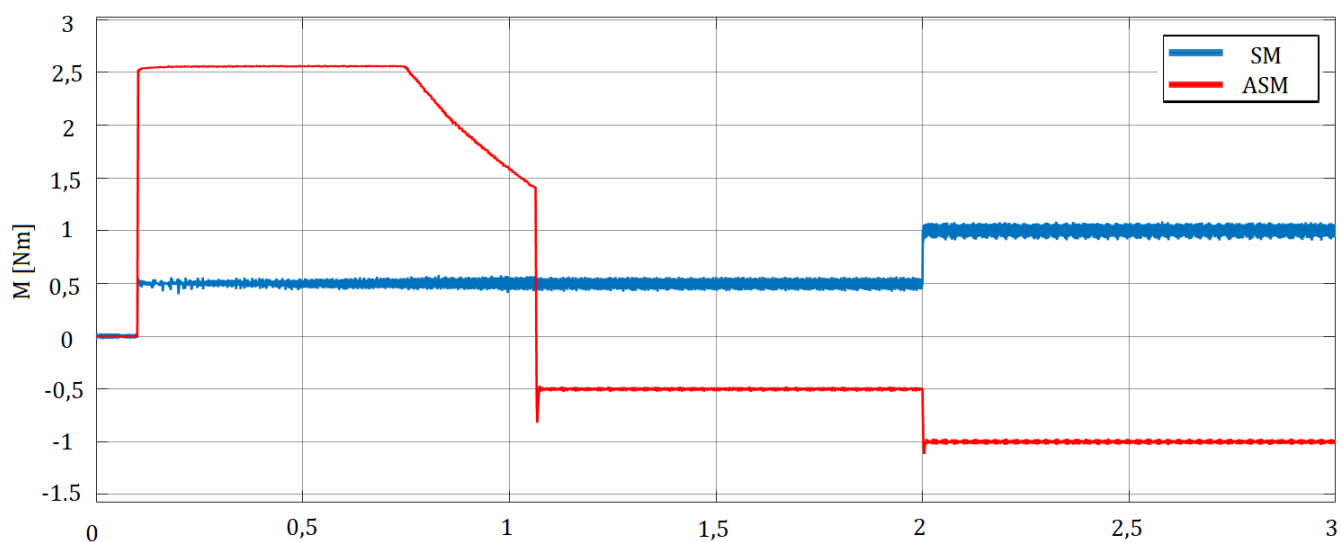
Obrázek 7.1: Průběh momentů motorů v simulaci 1



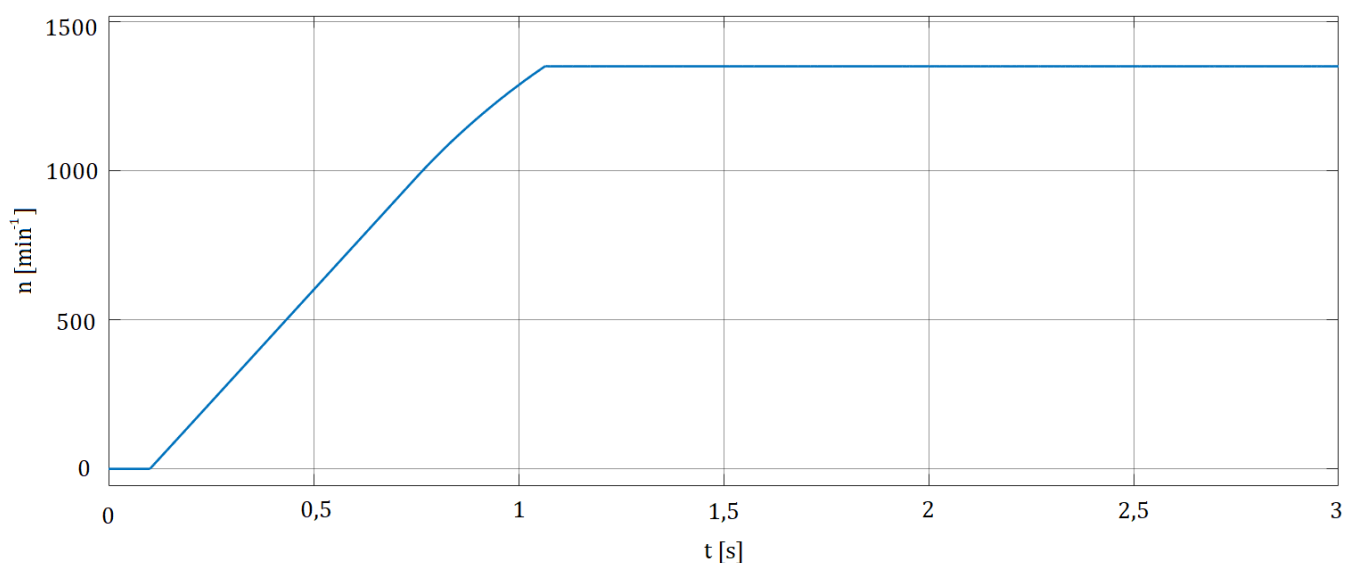
Obrázek 7.2: Průběh otáček v simulaci 1

## 7.2 Rozběh SM s konstantním momentem

Druhá simulace testuje funkčnost regulátoru proudu stejnosměrného stroje. V čase 0,1 je dán pokyn pro skokové zvýšení momentu stejnosměrného stroje na 0,5 Nm. Zároveň pracuje asynchronní motor s vektorovým řízením otáček na rotorový tok nastaveným na 1350 ot./min. Do dosažení určených otáček mají moment SM i ASM stejný směr. Oba se tedy podílí na rozběhu. Po dosažení 1350 ot./min začíná ASM pracovat proti SM stejným protimomentem, aby se otáčky držely stabilně na této hodnotě. V čase 2 sekundy dojde ke skokovému navýšení momentu SM na 1 Nm. Na to zareaguje vektorové řízení ASM vyrovnáním momentu s mírným překmitem.

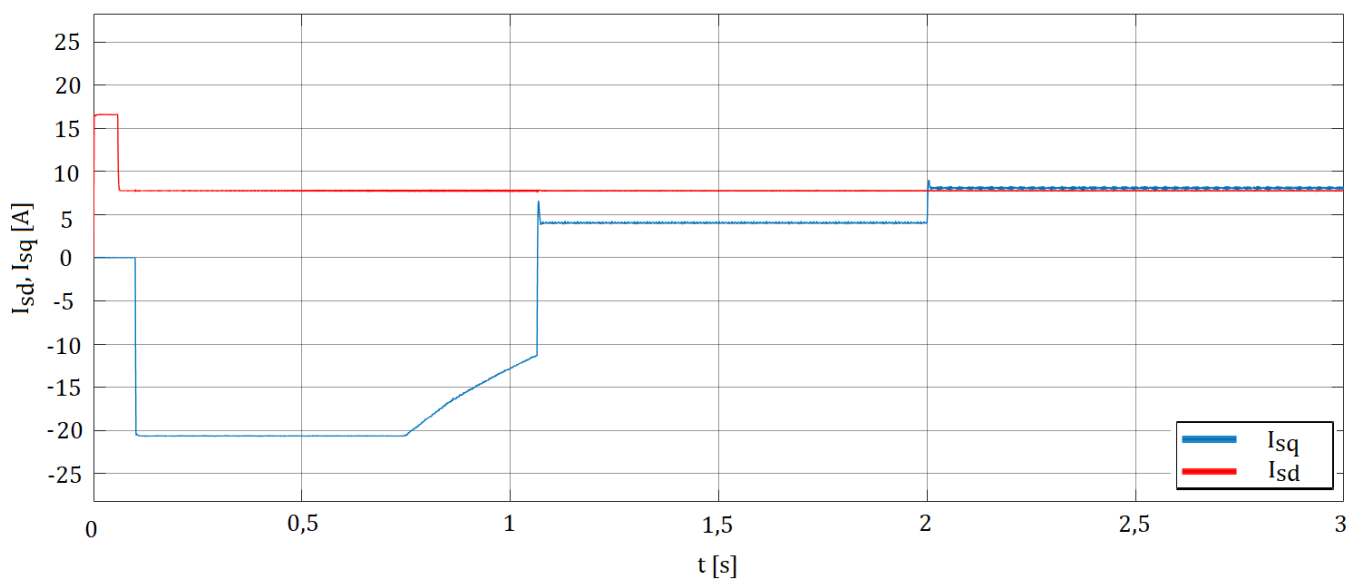


Obrázek 7.3: Průběh momentů strojů v simulaci 2

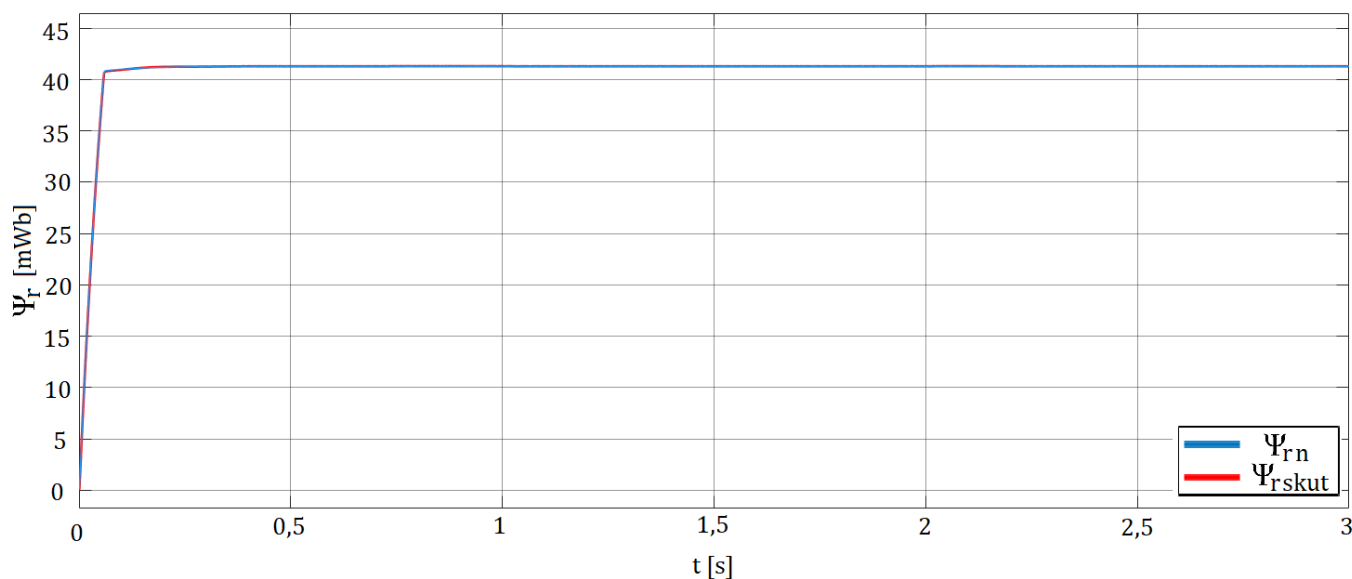


Obrázek 7.4: Průběh otáček v simulaci 2

Na obrázku 7.5 lze vidět průběh proudu asynchronního stroje  $i_{sd}$  a  $i_{sq}$ . Z něho pozorujeme, že složka proudu v ose d má vliv na sycení stroje, proto je tento proud kromě vyregulování na zadaný spřažený magnetický tok konstantní po celou dobu simulace. Z obrázku 7.6 lze vidět, že spřažený rotorový magnetický tok je správně vyregulován na zadanou hodnotu  $\psi_{rn} = 40,5 \text{ mWb}$ . Dále lze vidět, jak právě q složka proudu  $i_s$  má vliv na moment asynchronního stroje. To je právě dáno rozdělením proudu u vektorového řízení na momentotvornou a tokotvornou složku.



Obrázek 7.5: Průběh proudů  $i_{sd}$  a  $i_{sq}$  v simulaci 2

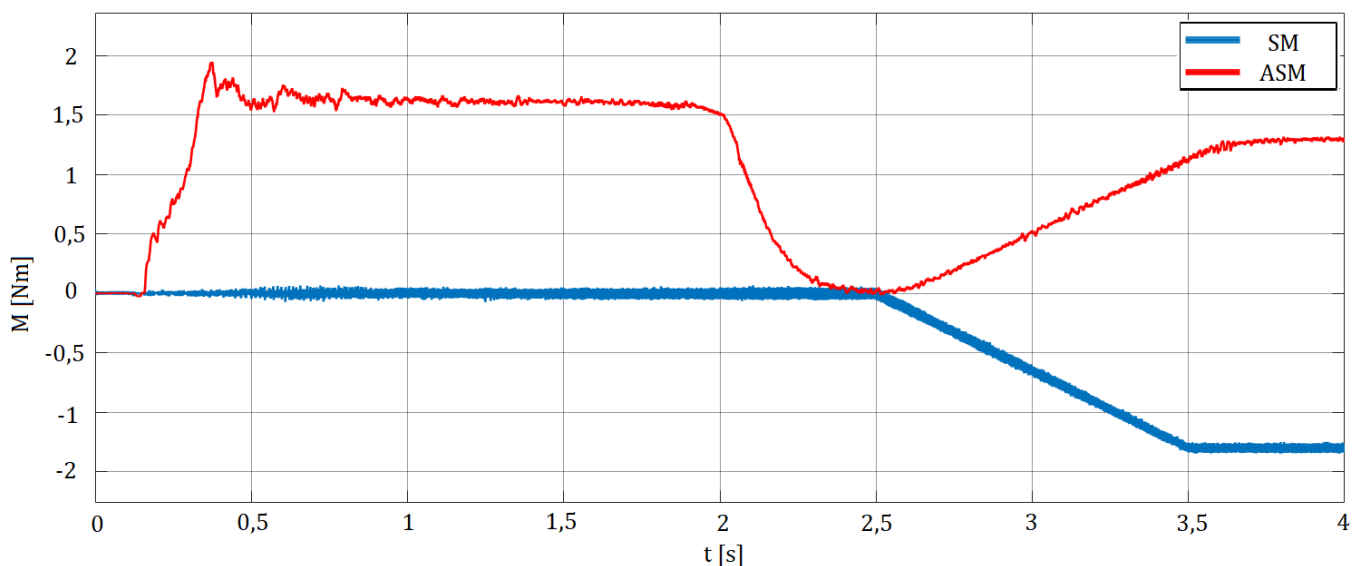


Obrázek 7.6: Průběh jmenovitého a skutečného spřaženého toku v simulaci 2



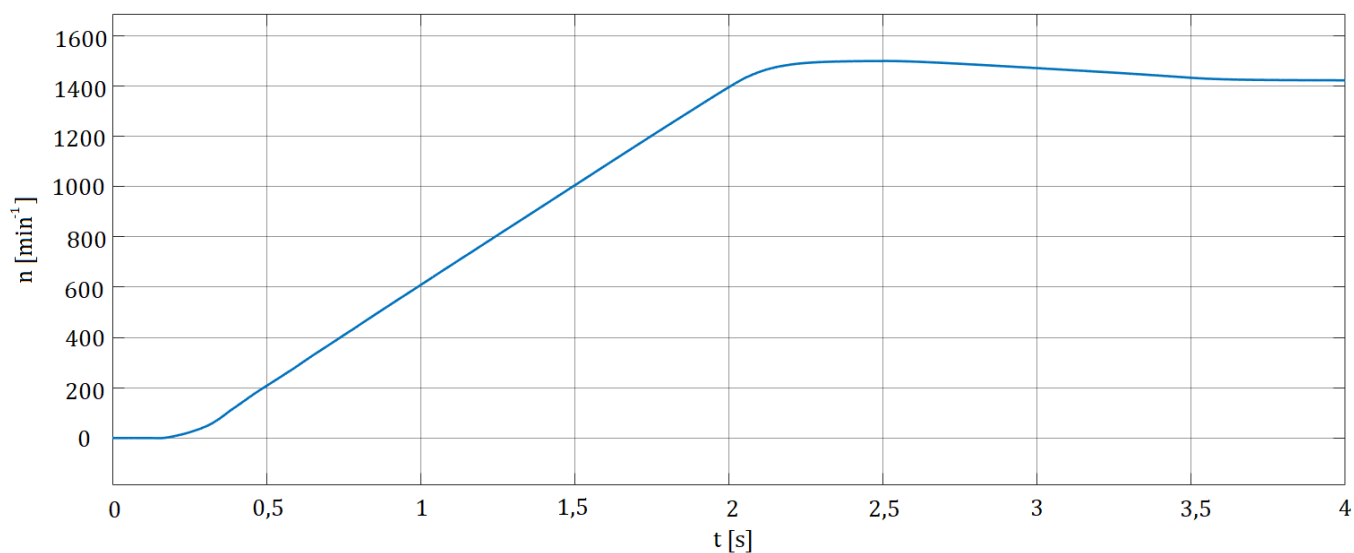
### 7.3 Rozběh ASM se skalárním řízením v otevřené smyčce a zatěžování

Regulační schéma pro skalární řízení v otevřené smyčce je sestaveno tak, aby zadávané otáčky byly otáčky synchronními. Proto je v simulaci nastavená synchronní rychlost 1500 ot./s. Stejně jako tomu bylo v simulaci 1 v kapitole 7.1 je v čase 0,1 s dán povel k rozběhnutí na zadané v tomto případě synchronní otáčky při nulovém zatížení.

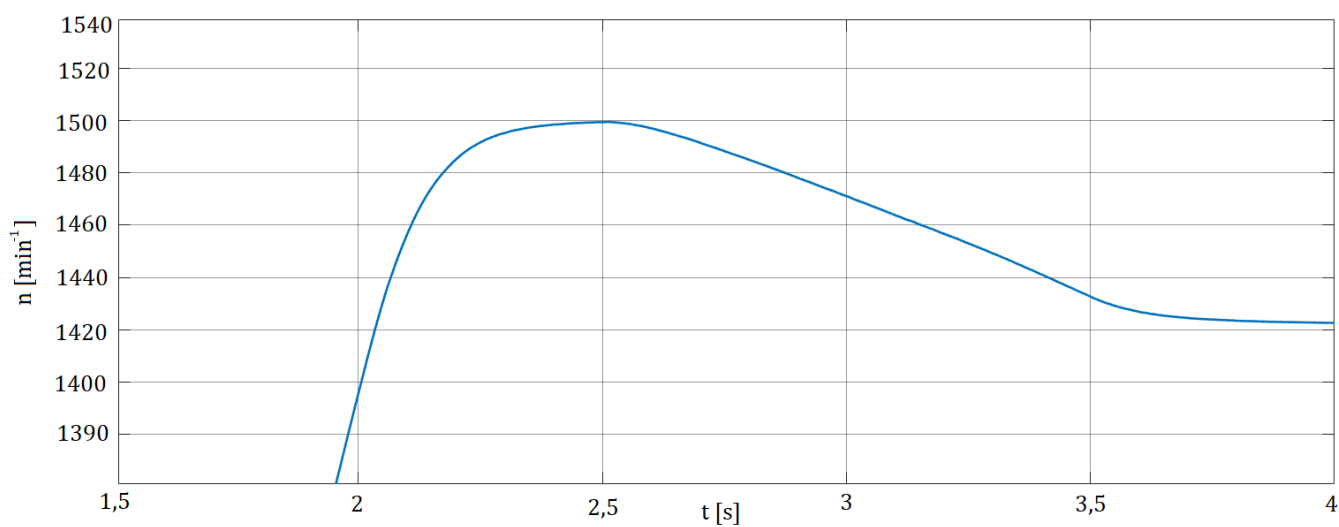


Obrázek 7.7: Průběh momentů strojů v simulaci 3

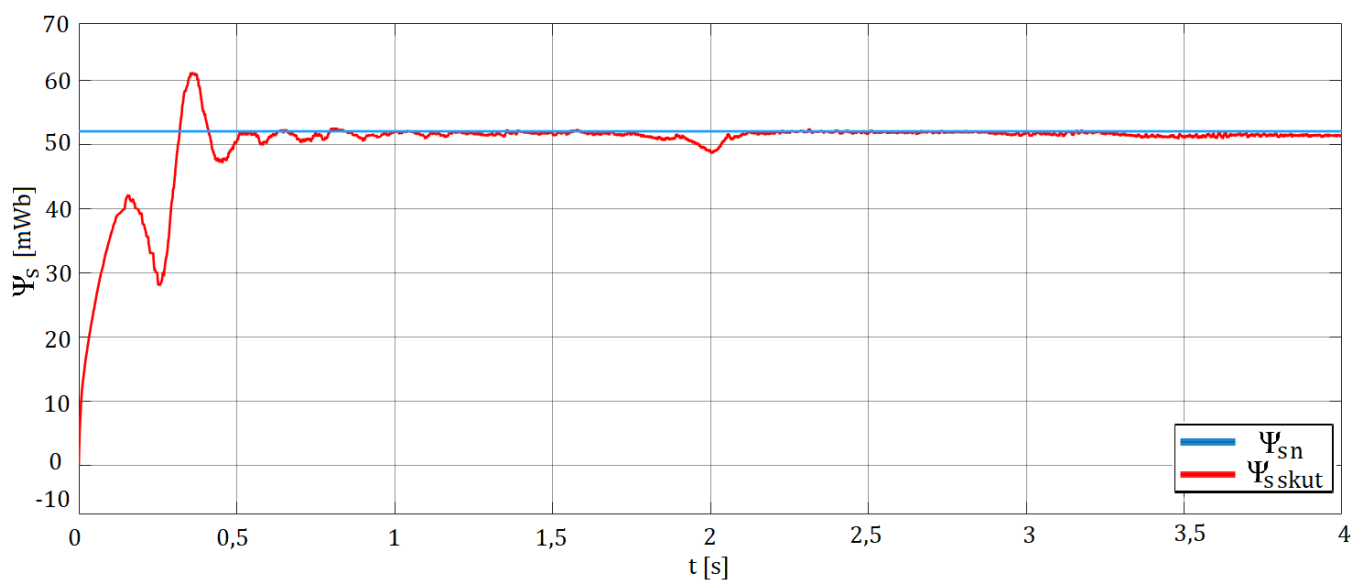
Z průběhu momentů na obrázku 7.7 lze vidět dlouhou dobu ustálení způsobenou nepřítomností zpětné vazby proudu. Pomalý nárůst momentu způsobil zpoždění ustálení otáček o necelých 0,5 s, jelikož bylo nastaveno dosažení otáček na 2 s. Postupné zvětšování zátěžného momentu způsobilo zmenšení otáček, které se při zátěžném momentu 1,3 Nm rovnalo 1420 ot/min. Zároveň vidíme na průběhu spřaženého magnetického toku statoru dlouhé ustálení na žádanou jmenovitou hodnotu.



Obrázek 7.8: Průběh otáček strojů v simulaci 3



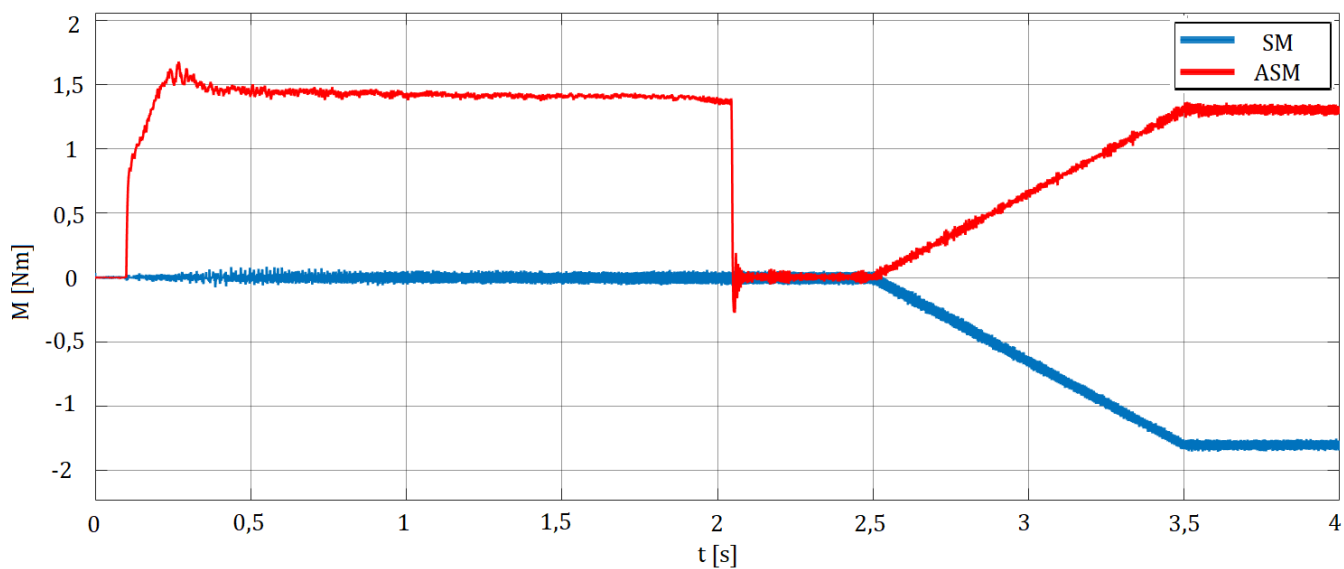
Obrázek 7.9: Detail průběhu otáček strojů v simulaci 3



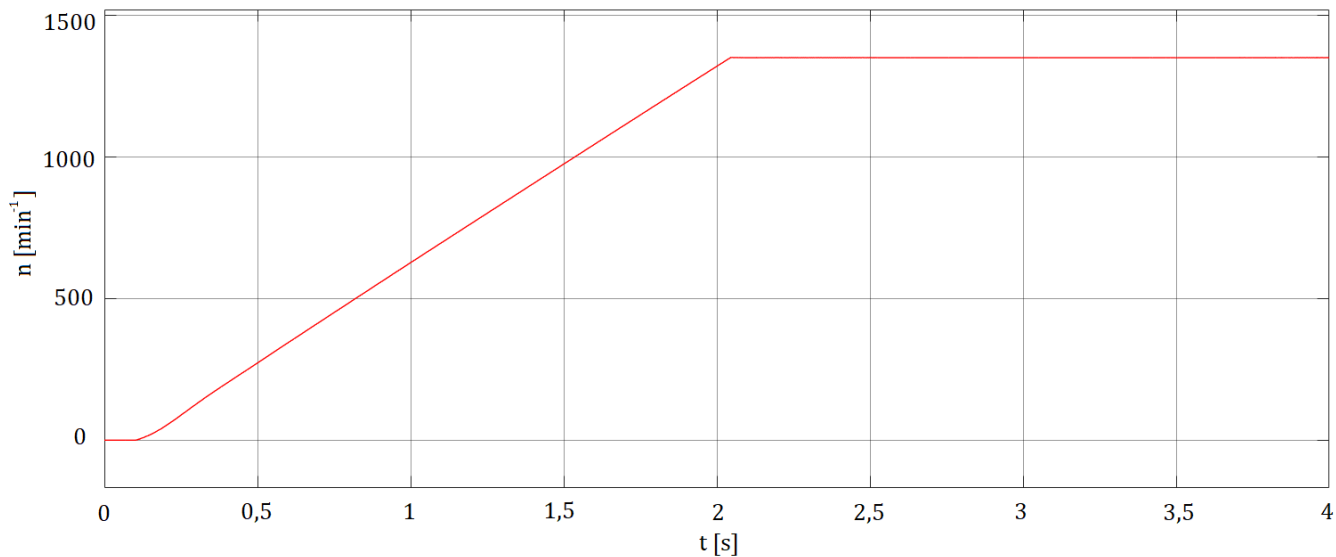
Obrázek 7.10: Průběh spřaženého magnetického toku v simulaci 3

## 7.4 Rozběh ASM se skalárním řízením se zpětnou vazbou a zatěžování

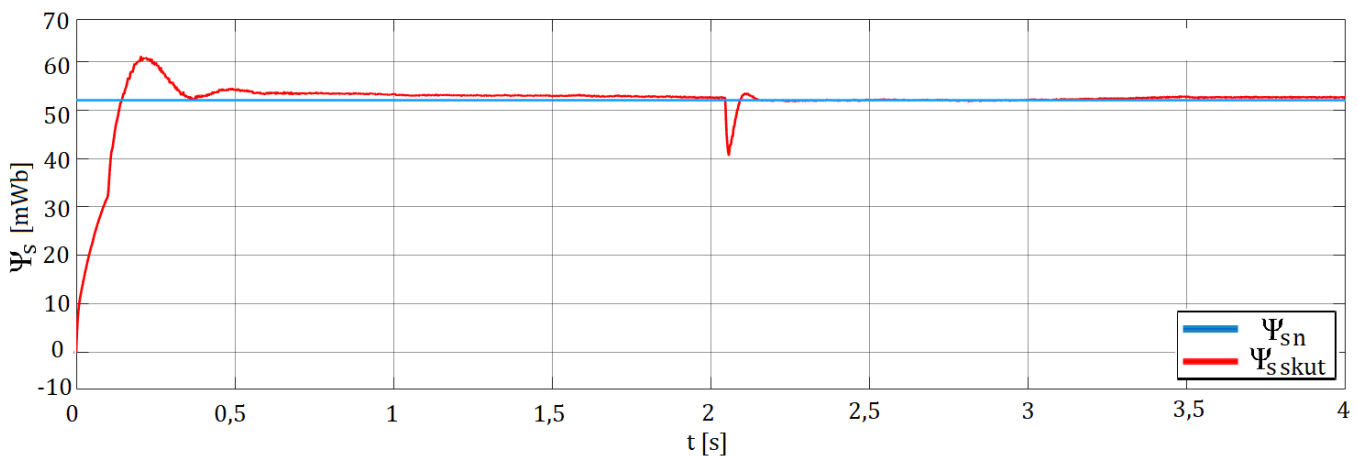
Tato simulace funguje za stejného nastavení jako předchozí simulace v kapitole 7.3. Jedinou změnou je práce asynchronního motoru se skalárním řízením se zpětnou vazbou.



Obrázek 7.11: Průběh momentů strojů v simulaci 4



Obrázek 7.12: Průběh otáček v simulaci 4



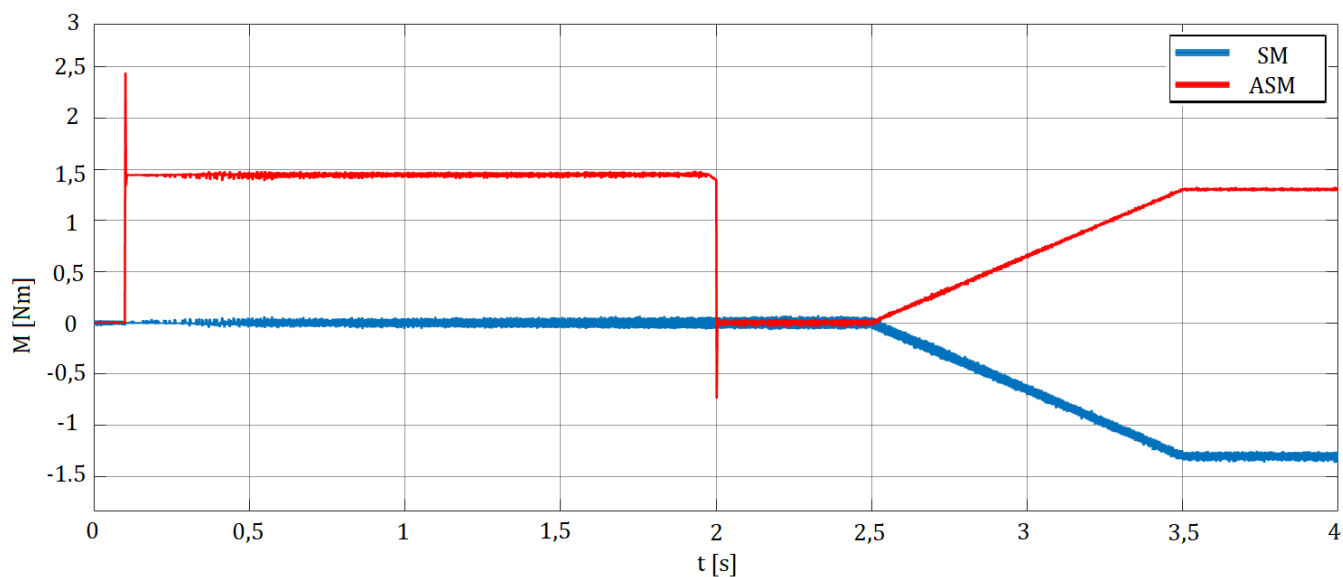
Obrázek 7.13: Průběh spřaženého magnetického toku v simulaci 4

První, čeho si lze povšimnout, je vyšší strmost nárůstu momentu asynchronního motoru a kratší doba ustálení oproti řízení s otevřenou smyčkou. Zároveň došlo k rychlejšímu ustálení jmenovitých otáček soustrojí za 2,1 s, což je rychlejší než v případě otevřené smyčky, ovšem stále desetinu sekundy později, než bylo požadováno. Strmost poklesu momentu v případě ustálení otáček je také mnohem větší. Jelikož je zde řízeno soustrojí na mechanické otáčky nedochází v průběhu zatěžování k jejich pádu, a tedy regulátor otáček rychleji reaguje na změnu.

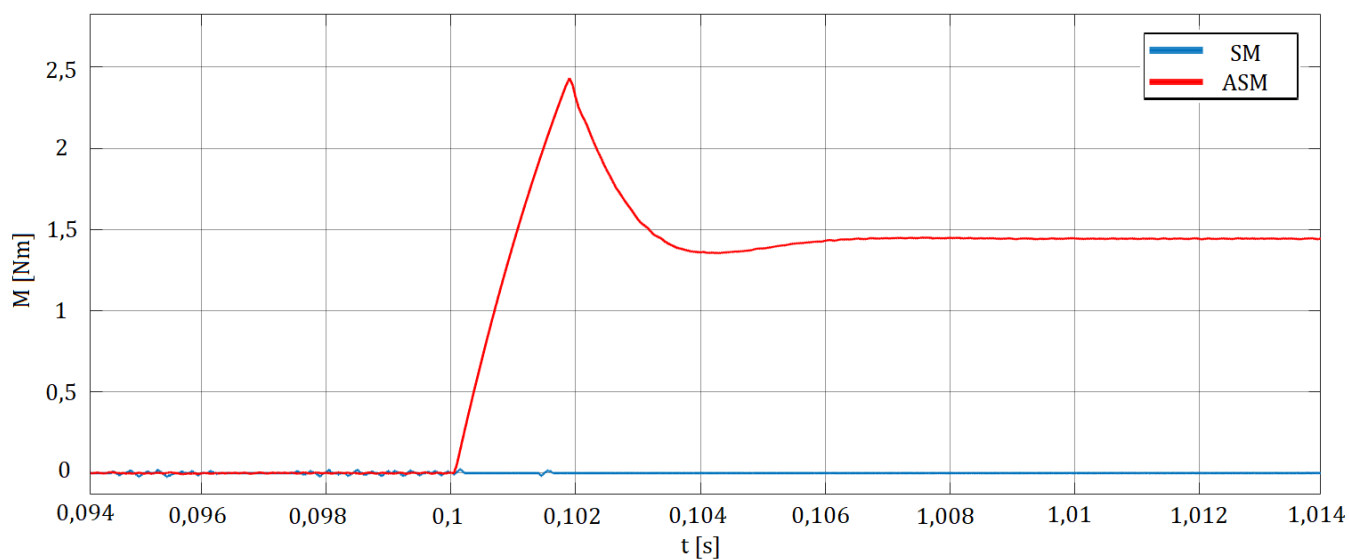
K ustálení spřaženého magnetického toku dochází opět dříve, než tomu bylo u řízení s otevřenou smyčkou a také s relativně menším překmitem.

## 7.5 Rozběh ASM s vektorovým rotorovým řízením a zatěžování

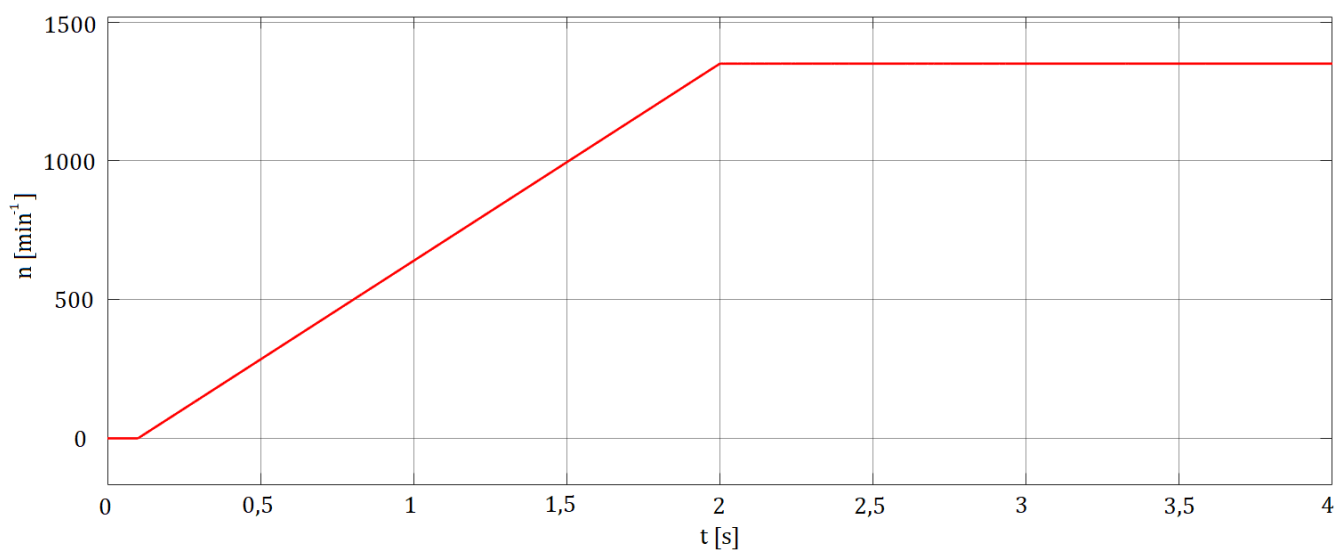
Jako tomu bylo v předchozích dvou simulacích, nastavené parametry simulace jsou až na rozdíl v řízení asynchronního motoru stejné. Na rozdíl od předchozích situací nás zajímá rotorový spřažený magnetický tok, který je regulován regulátorem toku, jenž předchozí schémata řízení neobsahovala.



Obrázek 7.14: Průběh momentu strojů v simulaci 5

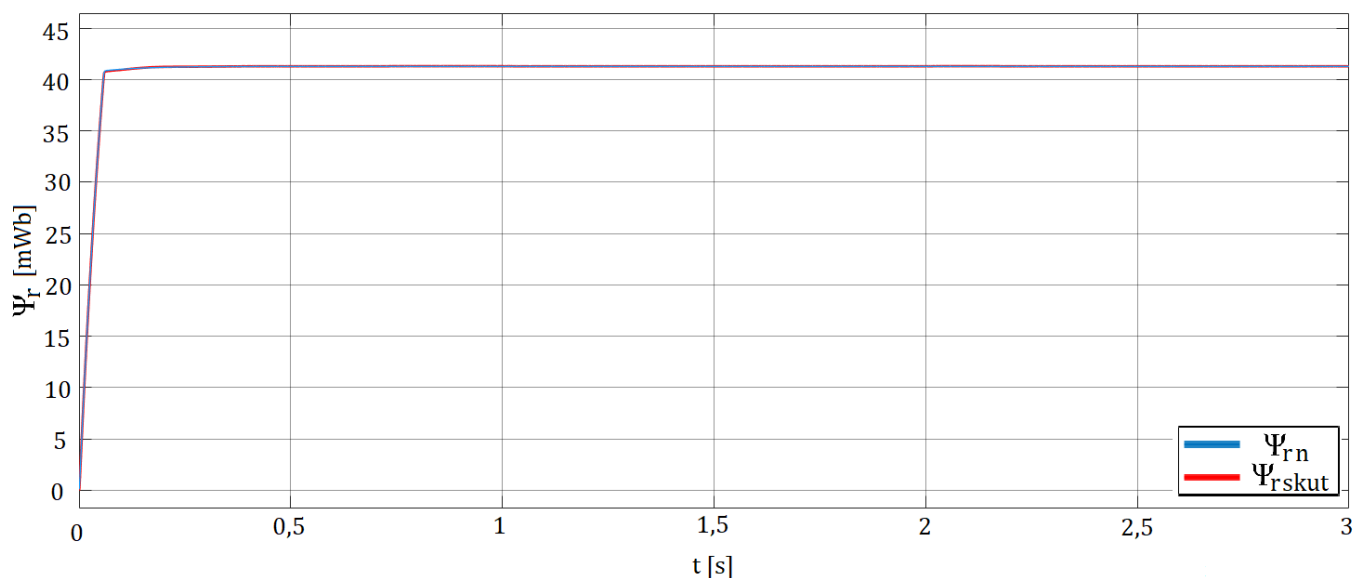


Obrázek 7.15: Detail průběhu momentů strojů v simulaci 5



Obrázek 7.16: Průběh otáček v simulaci 5

Oproti předchozím skalárním řízením zde vidíme výrazné zrychlení v případě ustálení rozběhového momentu. Na detailu na obrázku 7.15 lze vidět, že k ustálení momentu došlo už za 8 ms, což je několikanásobně kratší doba. Tato zvýšená dynamika, které vděčíme vektorovému řízení, má nevýhodu ve větším překmitu, ovšem po velmi krátkou dobu.



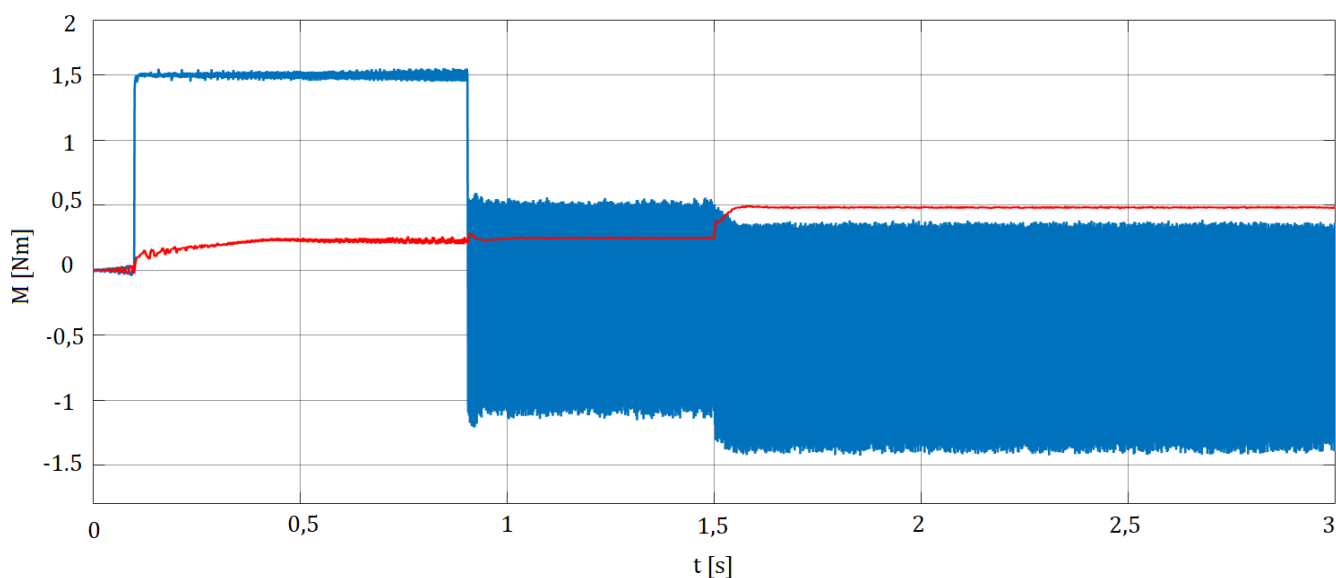
Obrázek 7.17: Průběh rotorového spřaženého toku v simulaci 5

V poslední řadě si lze všimnout i rychlého ustálení spřaženého magnetického toku rotoru na jmenovitou velikost 40,5 mWb. Správné navržení přenosu tohoto regulátoru zapříčinilo téměř nulovou odchylku mezi skutečným a žádaným rotorovým tokem.

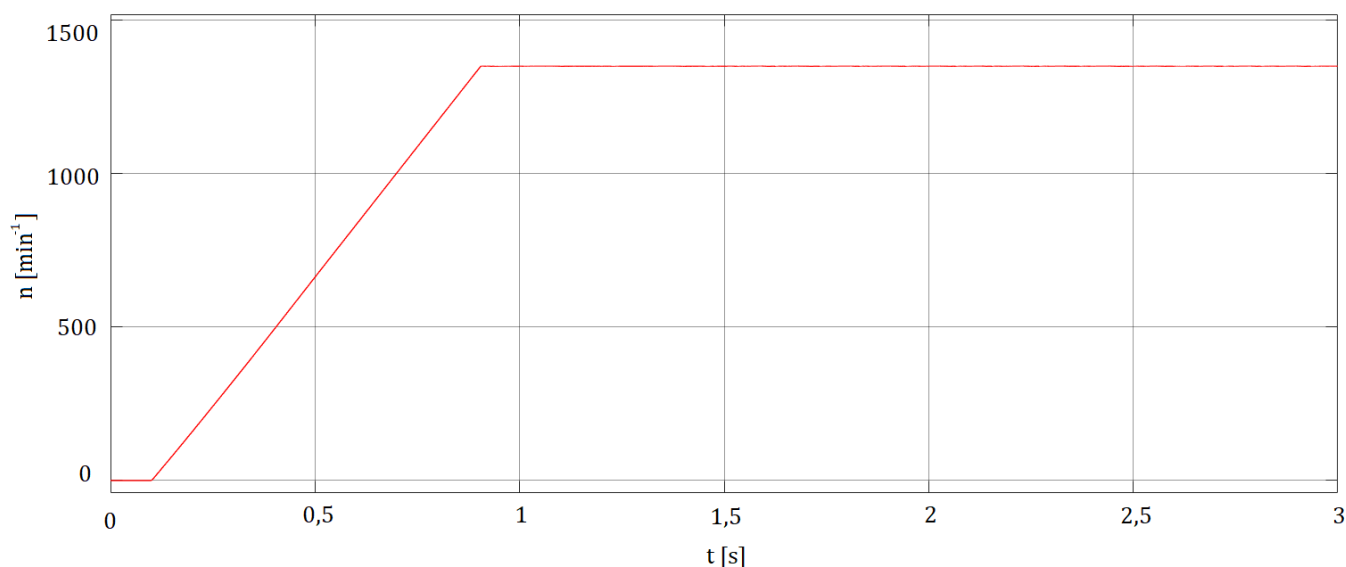
## 7.6 Rozběh ASM s konstantním momentem

Tato simulace má dokázat funkčnost rozběhu konstantním momentem jako tomu bylo v kapitole 7.2. Stejnosměrný motor se tu stává zátěží. Z počátku je soustrojí rozbíháno pomocí práce obou strojů. Asynchronní motor pracuje s konstantním momentem 0,5 Nm a stejnosměrný motor s maximálním momentem 3 Nm, které jsou limitovány maximálním dovoleným proudem 50 A. Právě tento velký odebíraný proud stejnosměrným motorem vede k poklesu napětí meziobvodu.

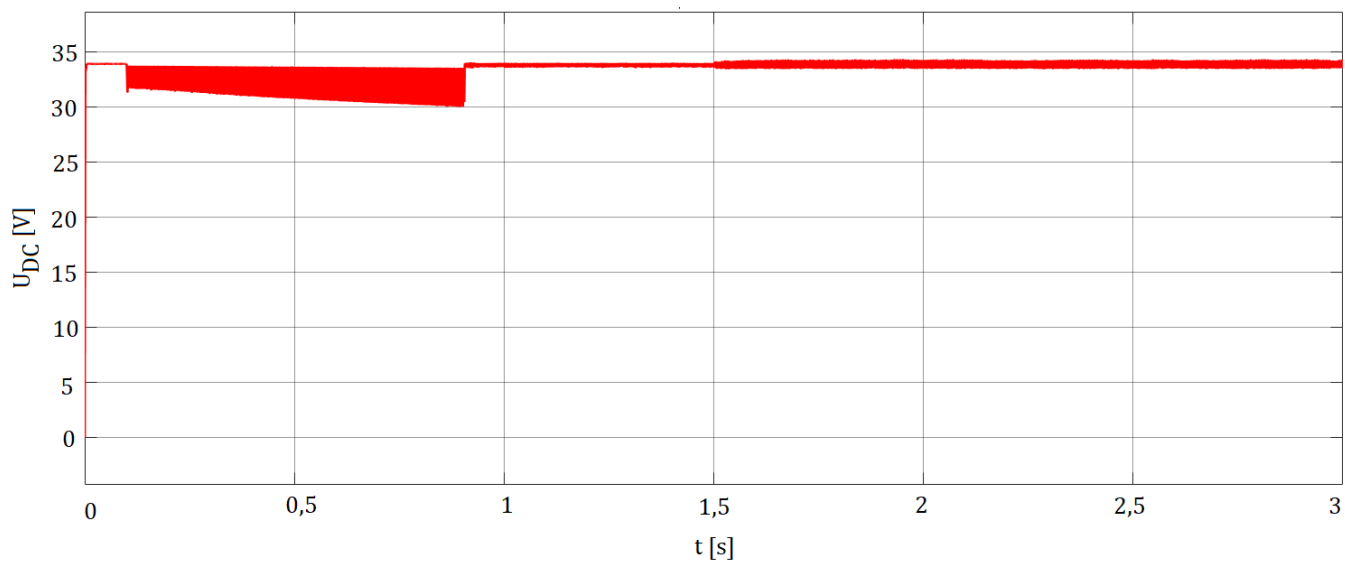
Měkkost meziobvodu má za následek pomalé ustálení na zadanou hodnotu momentu ASM na obrázku 7.18. S tím souvisí i odchylka statorového magnetického toku do doby, než stejnosměrný motor přestane pracovat s maximálním momentem. Jelikož stejnosměrný motor pomáhá s rozběhem soustrojí, při ustálení otáček nedochází k žádnému zvlnění otáček. Následně se stejnosměrný motor snaží držet zadané otáčky  $1350 \text{ min}^{-1}$  stejnou velikostí momentu jako asynchronní motor, ale opačného směru. V čase 1,5 s je nastaven požadovaný moment asynchronního motoru na 1 Nm, což téměř ihned vykompenzuje stejnosměrný motor protimomentem. V tomto čase vidíme i přechodný nárůst statorového spřaženého magnetického toku z důvodu zvýšení požadovaného momentu. Následně dojde opět k ustálení toku na zadaný jmenovitý tok 52 mWb.



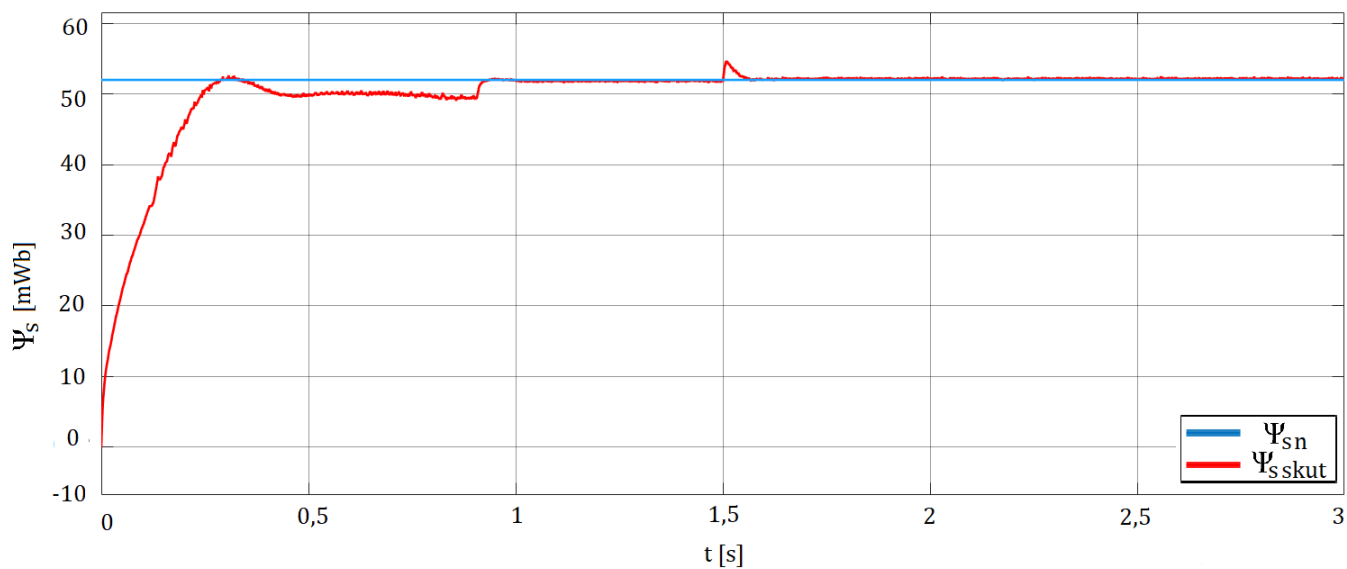
Obrázek 7.18: Průběh momentů strojů v simulaci 6



Obrázek 7.19: Průběh otáček v simulaci 6



Obrázek 7.20: Průběh napětí meziobvodu v simulaci 6



Obrázek 7.21: Průběh statorového spřaženého magnetického toku v simulaci 6



## 8 ZÁVĚR

Práce rozebírá simulaci laboratorního standu, který bude sloužit k výuce v dané oblasti elektrotechniky. Byly popsány části standu, které jsou obsaženy v simulačním modelu v programu Simulink.

V první řadě se jedná o obecné popsání stejnosměrného a asynchronního stroje s permanentními magnety. Následně jsou oba tyto stroje vymodelovány v programu Simulink. V případě asynchronního stroje se jedná o model tohoto stroje ve tvaru  $\Gamma$  článku, který je použit pro řízení otáček a momentu s orientací na statorový spřažený magnetický tok. Zároveň je vytvořen i model ve tvaru inverzního  $\Gamma$ -článku sloužící pro simulaci řízení s orientací na rotorový spřažený magnetický tok.

Byl vytvořen model pulsního měniče a trojfázového střídače, které napájí tyto stroje. V případě stejnosměrného stroje byla vytvořena kaskádní regulace otáček s možností nastavení regulace na zvolený konstantní moment, popřípadě proud.

Simulační model obsahuje skalární řízení otáček asynchronního stroje v otevřené smyčce a se zpětnou vazbou s orientací na statorový spřažený magnetický tok a vektorové řízení otáček s orientací na spřažený magnetický tok rotoru. Dále obsahuje i nedoladěný model vektorového řízení s orientací na spřažený statorový tok, který ovšem pro prudší nárůsty požadovaných otáček není funkční. Pro zatěžování stejnosměrného stroje konstantním momentem bylo vytvořeno regulační schéma skalárního řízení momentu asynchronního stroje v otevřeném smyčce. Zvolení z více způsobů řízení umožňuje studentům povšimnout si rozdílů u regulovaných veličin a s nimi provázanými průběhy proudů, napětí a spřaženého momentu.

Pro ovládání simulace je modelu vytvořeno rozhraní, ve kterém si studenti zvolí regulovanou veličinu stejnosměrného stroje, trend nárůstu dané veličiny a způsob řízení pulsního měniče. V případě asynchronního stroje si studenti kromě zvolení regulované veličiny a jejího trendu mohou nastavit, jaké regulační schéma bude v simulaci použito z dříve uvedených možností.

Z naměřených průběhů v kapitolách 7.1 a 7.2 lze vidět chování stejnosměrného stroje a správnou funkci regulátorů otáček a proudu při zatěžování. Vidíme rychlou reakci regulátorů na změnu požadavků systému jako je skoková změna žádaného proudu a otáček s rychle odeznívajícím přechodovým jevem.

Simulace v kapitolách 7.2, 7.3 a 7.4 jsou příkladem různých průběhů v závislosti na typu řízení asynchronního stroje. Na první pohled lze vidět pomalé ustalování a odchylku skalárního řízení v otevřené smyčce oproti řízení se zpětnou vazbou. Ještě lepší dynamiky dosahuje vektorové řízení s orientací na rotorový tok, což dokazuje výhody vektorového řízení jako je přesnost a rychlost v praxi.

# Literatura

- [1] Humusoft: ve službách vědy a techniky. Humusoft.cz [online].  
[cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.humusoft.cz/matlab/simulink/>
- [2] HUDÁK, Ondřej. *Laboratorní soustrojí s asynchronním a stejnosměrným motorem* [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=48728](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=48728). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [3] *Elektrické Stroje: Skriptum* [online]. [cit. 2017-12-28]. FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [4] JANUŠKA, A. *Model elektrické lokomotivy se stejnosměrným pohonem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 41s. Vedoucí práce: Ing. Ivo Pazdera, Ph.D.
- [5] PLEŠINGER, Jaroslav. *Bezkartáčový stejnosměrný trakční motor 13 kW s permanentními magnety* [online]. Praha, 2015 [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61931/F3-BP-2015-Plesinger-Jaroslav-Bezkartacovy\\_stejnosmerny\\_trakcni\\_motor\\_13%20kW.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61931/F3-BP-2015-Plesinger-Jaroslav-Bezkartacovy_stejnosmerny_trakcni_motor_13%20kW.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Karel Buhr, CSc.
- [6] Podklady k předmětu Elektrické pohony, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně.
- [7] CHMELÍK, Karel. *Stejnoseměrné a komutátorové elektrické stroje, obecný stroj*. Ostrava: Vysoká škola Báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 80-7078-857-7.
- [8] FIALA, Václav. *Vliv odporu rotorové klece na provozní parametry asynchronního motoru* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/23114/1/Bakalarska%20prace.pdf>. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ.

- [9] Podklady k předmětu Střídavé pohony, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně.
- [10] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektrotechniky: Svazek II- Pulsní měniče bez transformátoru* [online]. Brno, 2005 [cit. 2020-01-01]. Vysoké učení technické v Brně.
- [11] KLÍMA, Bohumil. *Číslicové řízení střídavých pohonů: Digital control of AC drivers: zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUT IUM, 2012. ISBN 978-80-214-4521-5.